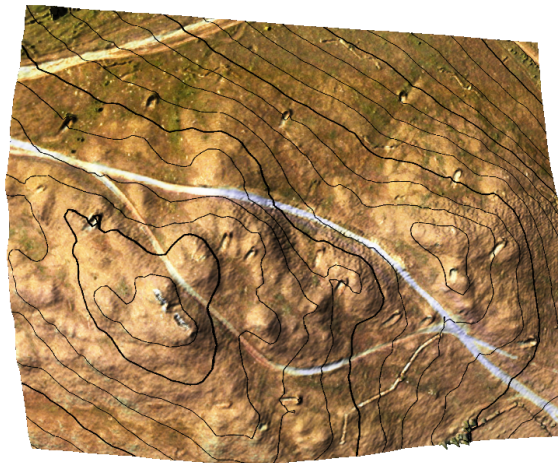


Nyugat-magyarországi Egyetem
Geoinformatikai Kar

Digitális domborzatmodellek adatgyűjtési lehetőségei, különböző forrású modellek pontossági vizsgálata

SZAKDOLGOZAT



Konzulensek:

Balázsik Valéria
adjunktus

Tarsoly Péter
tanársegéd

Készítette:

Miklós Ákos
földmérő/földrendező szak
geoinformatikai szakirány
nappali tagozat

Székesfehérvár
2012.

[kiírás eredeti példánya]

NYILATKOZAT

Alulírott **Miklós Ákos** (neptun kód: **NAZZCJ**) jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a **Digitális domborzatmodellek adatgyűjtési lehetőségei, különböző forrású modellek pontossági vizsgálata** című

szakdolgozat

(a továbbiakban: dolgozat) **önálló munkám**, a dolgozat készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. tv. szabályait, valamint az egyetem által előírt, a dolgozat készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében¹.

Kijelentem továbbá, hogy a dolgozat készítése során az önálló munka kitétel tekintetében a konzulenszt illetve a feladatot kiadó oktatót **nem tévesztettem meg**.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy a dolgozatot **nem magam készítettem**, vagy a dolgozattal kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Nyugat-Magyarországi Egyetem **megtagadja a dolgozat befogadását és ellenem fegyelmi eljárást indíthat**.

A dolgozat befogadásának megtagadása és a fegyelmi eljárás indítása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Székesfehérvár, 2012. május 28.

.....
hallgató

¹ **1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1)** A mű részletét - az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven - a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára - a cél által indokolt terjedelemben - szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást - a szerző nevével együtt - fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés.....	5
2.	A domborzatfelmérésről és domborzatábrázolásról.....	6
2.1	Domborzatról általában	6
2.2	Felmérési (adatgyűjtési) technológiák csoportosítása	7
2.3	A domborzatábrázolás klasszikus módszerei, bemutatása	8
2.4	A domborzatmodellek fajtái és előállítása.....	10
2.5	DDM-ek felhasználási területei.....	13
3.	Az alkalmazott domborzatfelmérési technológiák bemutatása.....	14
3.1	A LiDAR technológia.....	14
3.2	A GNSS technológia	16
3.3	A Topográfiai felmérés.....	17
3.4	Az SRTM felmérés.....	18
4.	A barometrikus elvű felmérés ismertetése	19
4.1	A barometrikus magasságmeghatározás elve.....	20
4.2	A módszer megalapozása, műszervizsgálat	21
4.3	Pilot projekt, méréstervezés.....	23
4.4	Egy gyakorlati alkalmazás.....	28
5.	A feladat végrehajtásának leírása	30
5.1	A mintaterület bemutatása.....	30
5.2	Adatgyűjtés.....	32
5.2.1	LiDAR adatok.....	32
5.2.2	GNSS felmérés.....	33
5.2.2.1	Származtatott GPS-mérések.....	36
5.2.3	Barometrikus felmérés	37
5.2.4	Topográfiai felmérés	38
5.2.5	SRTM adatok.....	39
5.3	A koordinátajegyzéktől a domborzatmodellig	41
6.	Kiértékelés és vizsgálat	48
6.1	Általános tapasztalatok.....	48
6.2	Összehasonlítás és pontossági vizsgálat.....	49
6.3	Értékelés, költséghatékonyság.....	59
7.	Összegzés	64
8.	Irodalomjegyzék	66
9.	Mellékletek.....	67

1. Bevezetés

Gyerekkorom óta egyik legfontosabb szabadidős tevékenységem a természetjárás. Általános iskolás koromban szinte minden hétvégén túráztunk, túraversenyeztünk osztályfőnököm vezetésével, később nem egyszer értünk el országos helyezéseket. A versenyekre való felkészítés során kerültem közelebbi kapcsolatba a térképpel, ahol a terep- és térképtani ismeretek keretében a szintvonalas domborzatábrázolás lényegét és különféle trükkjeit is elsajátíthattam. Ez irányú érdeklődésem később is megmaradt, így kedvelt tantárgyam volt a GEO-n a topográfia, valamint a ráépülő topográfiai terepgyakorlat. Nem csoda hát, hogy a térinformatikai ismeretkörből is a digitális domborzatmodellezés ragadott meg leginkább. Kedvtelésből sokat kísérleteztem az ingyenesen hozzáférhető SRTM² domborzatmodellel, annak megjelenítésével, belőle származtatott adatok létrehozásával.

Szakdolgozati témám kiválasztásában a leírt orientációnak meghatározó szerep jutott az alapokat (domborzatmodellezés) illetően. További szempont volt, hogy rengeteg ötletet, kísérletezési-újítási lehetőséget, kutatási irányt rejtett magában annak ellenére, hogy a korábbi években többen választottak hasonló témát. Nagyon fontos volt még, hogy a választott kelet-bakonyi mintaterületet korábban több túráim során bejártam és megkedveltem, valamint a területről idő közben elkészült LiDAR³-felmérés, amit, mint referenciát tudtam használni az összehasonlításhoz.

² Shuttle Radar Topography Mission

³ Light Detection And Ranging

2. A domborzatfelmérésről és domborzatábrázolásról

2.1 A domborzatról általában

A domborzat a fizikai földfelszín és a légkör találkozásának határfelülete. Alkalmazási körtől függően a vízzel borított részeken a vízburok és a földkéreg, vagy a légkör és a vízburok határoló felületén is értelmezhetjük a domborzatot.

Létrejöttében végső soron a Nap – Föld – Hold dinamikus rendszerében meglévő, időről időre változó erőhatások felelősek. Ezek hozzák ugyanis létre azokat a belső (endogén) és külső (exogén) erőket, melyek a felszín formálását végzik. [Mélykúti 2011]

A **belső erők** két nagy csoportba oszthatók:

A *vulkánosság* alatt a Föld szilárd kérge alatti folyékony magmának a földkéregre gyakorolt deformációs hatását értjük. Ha a magma nem tör a felszínre, csak a felszínközeli, kisebb nyomású rétegek közé préselődik és a fölötte lévő részeket megemeli, mélységi vulkánosságról, ha a magma a kérget átszakítva kitör, felszíni vulkánosságról beszélünk.

A *kéregmozgás* a kőzetlemezek hőmérsékletcsökkenés során bekövetkező zsugorodásának következménye. A kőzetlemez állapotától függően gyűrődik, repedezik, töredezik.

A **külső erők** szintén két részre bonthatjuk:

A *mállás* a kőzetek helyben végbemenő aprózódását jelenti. Előidézésében fizikai, kémiai és organikus hatások vesznek részt. A fizikai mállás alatt első sorban a hőmérséklet periodikus változása következtében kialakuló repedezést értjük. Kémiai mállást – leginkább a mészkőben – az oldódási folyamatok okoznak. Az organikus mállás előidézői a különböző élőlények, melyek mind fizikai úton (növekedésük során), mind kémiai úton (anyagcseréjük során) fejthetnek ki hatást.

A *letarolás* a mállás során felaprózódott kőzet elszállítását jelenti, melyet a gravitáció, a víz, a szél és a jég munkája idéz elő.

2.2 Felmérési (adatgyűjtési) technológiák csoportosítása

A domborzatfelmérési technológiákat két nagy csoportba sorolhatjuk. Ezek:

- a **helyszíni** felmérések és
- a **fotogrammetriai és távérzékelési** eljárások.

2.2.1 Helyszíni felmérések

A helyszíni felmérések körébe tartozik minden olyan technológia, amely során a felmérés a terepen tartózkodva, valamennyi felméréndő pontot felkeresve történik meg. Ide tartoznak a hagyományos topográfiai felmérési módszerek, melyeket

- **numerikus** (tahimetria)
- **grafikus** (mérőasztalos)

eljárásokra oszthatunk fel, de ide sorolható még a szakdolgozati feladatban is alkalmazott

- **műholdas** helymeghatározásra alapuló RTK mérés és a
- **barometrikus** elven történő magasságmeghatározás is

2.2.2 Fotogrammetriai és távérzékelési eljárások

Ebbe a tárgykörbe tartoznak azok a technológiák, melyeknél a mérőszemélyzetnek nem szükséges felkeresnie a mérendő terepi pontokat, hanem valamilyen módon távolról (levegőből vagy a világútból) gyűjtünk adatokat. Előnyt jelent a helyszíni mérésekhez képest, hogy – az eljárás megválasztásától függően – gyakorlatilag bármilyen méretű területről és bármilyen sűrűséggel mintavételezhetünk adatokat anélkül, hogy *oda kéne mennünk*. Ide tartoznak a

- **fototopográfiai** eljárások, melyeket tovább bonthatunk
 - kombinált,
 - differenciált és
 - univerzális eljárásokra
- **légi lézerletapogató** (airborne laser scanning) eljárások (pl. LiDAR)
- **űrbéli radar-interferometrián** alapuló (IFSAR) eljárások
(pl. így készült az SRTM domborzatmodell)

2.3 A domborzatábrázolás klasszikus módszerei, bemutatása

A térképészet az újkorig meglehetősen keveset fejlődött. Többnyire tapasztalati és vizuális információkból felépített rajzok voltak ezek, topológiai viszonyokat szemléltettek: kereskedelmi úthálózatot, városokat az utak mentén, nagyobb hegységeket és vizeket az utak megfelelő oldalán. A domborzatábrázolás megjelenítése is sematikus, csupán tájékoztató jellegű.



1. ábra

Tabula Hungariae, 1528.

Két típusa létezett, az *oldalnézetes* és a *madártávlati* ábrázolás, ezek kúpszerű jelekkel ábrázolták a sík vidékektől különböző tájakat. Előbbire a klasszikus példa Lázár deák 1528-as Tabula Hungariae-ja, melyből az 1. ábrán láthatunk egy részletet.

Az újkori földrajzi felfedezések, és a részben általa indukált tudományos-technikai fellendülés hozta magával a térképészet fejlődését is. Ekkoriban jelent meg az igény arra, hogy a térkép ne csak szemléletes legyen, hanem metrikus is, ami a mai értelemben vett térképek alapkövetelménye. Ilyen igénnyel először a XVIII. században készültek térképek, Magyarország tekintetében kiemelkedő Mikovinyi Sámuel munkássága az 1730-as években. Az általa készített megyetérképek már felülnézetesen, az ábrázolás vízszintes értelmű helyességének igényével, vetületben ábrázolták a terepet, a térképezést már geodéziai háromszögelés alapján végezte.

A domborzatábrázolás ekkor szokásos megoldása a *pillacsíkos* – más néven *lendületcsíkos* – ábrázolás, melynél a magassági tartalomra csak szubjektív becslést kaphatunk. A csíkozás iránya a lejtésiránnyal közel párhuzamos, vastagságával a lejtés mértékét próbálja szemléltetni. Ebből a korszakból – az 1780-as évekből – származik a Habsburg Birodalom Első Katonai Felmérése, mely addig példátlan részletességgel, 1:28800-as méretarányban ábrázolja Magyarországot. Ebből a



2. ábra

Első Katonai Felmérés, 1783.

Forrás: Arcanum Adatbázis Kiadó

térképműből jeleníti meg a szakdolgozatom tárgyául választott mintaterület környékét a 2. ábra.

A pillacsíkozásos domborzatábrázolás továbbfejlesztésével jött létre a XIX. században alkalmazott, *geometriai elveken alapuló csíkozás*. Az eljárást Lehmann dolgozta ki 1799-ben, róla *Lehmann-féle csíkozásnak* is nevezik. A csíkok – valójában rövid szakaszok – vonalvastagsága rögzített szabályok szerint a lejtőszöggel arányos, iránya a lejtéssel párhuzamos. Ezek a jellemzők a korabeli műszerekkel objektíven megmérhetőek voltak. Ezzel a fajta domborzatábrázolással készült a kor összes topográfiai térképe, így a Második Katonai Felmérés is a XIX. század közepén. A mintaterületem környékét ábrázolja ebből a 3. ábra. (A sárgával jelölt terület a Leányvágó, tőle közvetlenül Északra látható a Gomba-hegy. Az erdő szokásos színénél itt látható halványabb zöld árnyalat rétre, kaszálóra utal.)

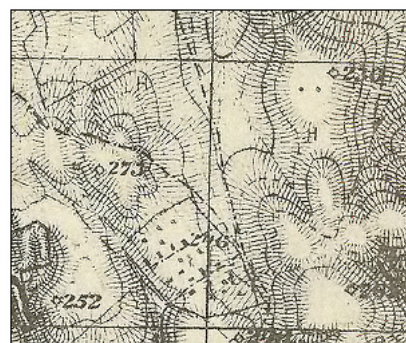


3. ábra

Második Katonai Felmérés, 1847.

Forrás: Arcanum Adatbázis Kiadó

A korszerűbb magasságmérési módszerek, pontosabb műszerek, és később a sztereo-fotogrammetria megszületése tette lehetővé a *szintvonalas domborzatábrázolás* elterjedését a XIX. század végétől. Ezt alkalmazzuk általánosan a mai napig is. A 4. ábrán a Harmadik Katonai Felmérés – sajnos csak fekete-fehér – egy részlete látható, amelyen még a csíkozásos módszerrel együtt jelenik meg a szintvonalrajz. A korábbiakhoz képest óriási előrelépést jelentett az a tulajdonsága, hogy ezzel a terep bármely pontjára levezethető a pontbeli magasság – a két szomszédos szintvonal magasságértékének interpolálásával.



4. ábra

Harmadik Katonai Felmérés, 1882.

Forrás: Arcanum Adatbázis Kiadó

A szintvonal a terep egy választott alapfelülettől mért azonos magasságú pontjait összekötő vonal. A térképen szintvonalakat egymástól azonos magasságkülönbségű szinteken veszünk fel. Ez a magasságkülönbség az *alapszintköz*. Értékét a térkép méretarányának és a domborzati viszonyoknak megfelelően választjuk meg, hogy a szintvonalak ne legyenek se zavaróan sűrűen, se a célnak megfelelő részletességnél

ritkábban. Dombvidékek esetén – mint amilyen a mintaterületem is – az 1:10000-es méretarányú topográfiai térképeken 2,5 m-es alapszintköz használatos.

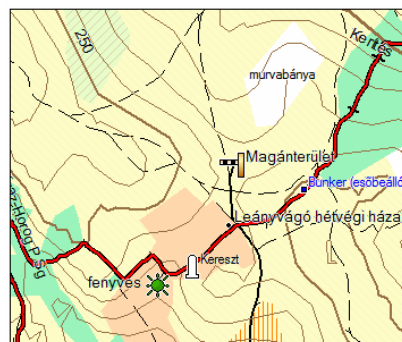
A teljesség kedvéért álljon itt még két térképrészlet, mely bemutatja a mintaterület későbbi ábrázolásait: az 5. ábrán egy 1941-es katonai topográfiai térkép részlete látható, a 6. ábrán pedig már egy digitális vektoros turistatérkép: a turistautak.hu megfelelő kivágata, melynek szintvonalai az SRTM digitális domborzatmodellből lettek levezetve.



5. ábra

Topográfiai térkép 1941-ből

Forrás: Arcanum Adatbázis Kiadó



6. ábra

Digitális vektoros turistatérkép, 2012.

Forrás: www.turistautak.hu

További domborzatábrázolási módszerek is léteznek, a teljesség igénye nélkül ilyen a hipszometrikus (intervallumonkénti rétegszínezéses), árnyékolásos, szintörléses stb. ábrázolások. Ezek azonban az előbbiekből levezethető, vagy az előbbieket kiegészítő módszerek és nem metrikusak, főleg a vizualizációt, a plasztikusságot segítik elő.

2.4 A domborzatmodellek fajtái és előállítása

2.4.1 A digitális domborzatmodellek fajtái

A domborzat meghatározása során ismertetett határfelület értelmezése körül több kérdés is felvetődik. Általános esetben úgy tekintünk rá, mint egy kölcsönösen egyértelmű megfeleltetésre az alapfelület és a fizikai felszín között, holott különleges domborzati viszonyok (mint például függőleges, vagy visszahajló sziklafalak, üregek stb.) esetén előfordulnak ebbe a képbe nem illeszthető formák. További megfontolást igényel a tényleges felszín meghatározásában, hogy - például a növényzet miatt – egy bizonyos szintnél pontosabban nem lehet megállapítani, hogy hol ér véget a kőzetburok, és hol kezdődik az atmoszféra. Ez tehát határt szab a modell pontosságának is.

A felszín modellezésének – és ezen belül a digitális modellezésnek – során tisztázni kell, hogy milyen igényre, milyen célokra készítjük. Szűkebb értelemben megkülönböztetjük a digitális felszínmodelleket és a digitális domborzatmodelleket.

A **digitális felszínmodell (DFM)** az alapfelületre merőleges irányból, felülről látható pontok által meghatározott felület magassági adatait tartalmazó adatbázis. Ebben tehát minden benne foglaltatik, az épületeket, növényzetet stb. is beleértve.

A **digitális domborzatmodell (DDM)** a földfelszín pontjai által alkotott felület magassági adataiból létrehozott adatbázis.

Használatosak még a **digitális terepmodell** (digital terrain model; DTM) és a **digitális magasságmodell** (digital elevation model; DEM) fogalmak is. Ebben a meghatározásban a DTM alatt különféle elemzésekre alkalmas programokkal és kiegészítő információkkal ellátott modellt, DEM alatt csupán nyers magassági adatok rendezett halmazát értjük, ám a határvonal a két fogalom között nem éles, olykor egymás szinonímjaként használatosak. [Zentai 2000]

2.4.2 A digitális domborzatmodellek előállítása

A digitális domborzatmodell általános definíciója:

„A digitális domborzatmodell a terep domborzati viszonyairól gyűjtött magassági adatok

- számszerű formában rögzített
- célszerűen rendezett halmaza
- a szükséges számítási eljárásokkal együtt,

melyek segítségével a további magassági adatok és információk egyértelműen, a megfelelő megbízhatósággal levezethetők.” [Mélykúti 2011]

A domborzatmodellek digitális leképzése tehát minden esetben egy adatbázis, mely valamilyen formában megadott vízszintes koordinátákhoz rendelt magasságértékeket tartalmaz. Ezen belül alapvetően kétféle leírási mód létezik: a raszteres és a vektoros mód.

A **raszteres leírási mód** valamilyen szabályos rácsháló egymástól egyenletes távolságokra lévő pontjaiban tárolja a magasságokat, a terepidomokra való tekintet nélkül. Ennek a csoportnak a legegyszerűbb és legelterjedtebb tagja a **grid modell**, mely nem más, mint egy négyzetes rácsháló, melynek pontjai sorokba és oszlopokba rendezetten, azokban egymástól egyenlő távolságokra helyezkednek el.

A felméréseim elemzésénél ezt a modell típust alkalmaztam, mivel egyszerű, összehasonlításra közvetlenül alkalmas, azonos rácssűrűségek esetén a modellpontok több mintában egymásnak megfeleltethetőek, így egyszerűen képezhetünk például különbségmodelleket. Hátránya azonban a modellnek, hogy kellő sűrűségű rácshálót kell felvenni ahhoz, hogy a teljes területen kellő részletességű modellt kapjunk, ez azonban egyes területeken felesleges adatsűrűséget jelenthet.

A rácspontok magasságértékeit a (nem szabályosan elhelyezkedő) mért pontok közötti interpolációval számítják. Az interpolációra több matematikai módszer is rendelkezésre áll, melyek közül a megfelelő kiválasztása számot tevően befolyásolhatja a modell pontosságát.

Az interpoláció során igyekszünk meghatározni olyan kétváltozós függvényeket, mely adott szempontok alapján legjobban közelíti az ismert magasságú pontjainkat. A függvény érvényességi területe alapján három csoportra oszthatjuk az interpolációk típusait: [Mélykúti 2011]

- Egy függvényt határozunk meg az egész területre (globális interpoláció), ekkor azonban vagy egy nagyon bonyolult – általában polinomiális – közelítő függvényt, vagy elnagyolt interpolációt kapunk eredményül.
- Helyi közelítő függvényeket határozunk meg részterületenként, például adott sugarú körön belüli pontokra kiszámítva. (lokális interpoláció)
- Minden egyes rácspontban újabb és újabb közelítő függvényt definiálunk (pontonkénti interpoláció)

A **vektoros leírási mód** lehetőséget ad arra, hogy szabálytalan elrendezésű ponthalmaz pontjait közvetlenül – a helyükön – foglaljuk a modellbe, ezáltal mind a felmérés, mind a modellezés során tekintettel lehetünk a domborzat részletességváltozásaira. A változatos, mikrodomborzatos területeken lehet gyakrabban, a jellegtelenebb területen elég ritkábban pontot mérni és tárolni, a modell részletessége csupán ettől függ.

Ennek a módnak legelterjedtebb megvalósítása a **TIN modell** (triangulated irregular network, szabálytalan háromszöghálózat). Ebben a szomszédos modellpontok háromszöglapok csúcsait alkotják, a modellfelület pedig ezeknek a lapoknak az összességéből áll. A modell előnye, hogy elég csak a felmért pontok adatait tárolni, ami egy hasonló részletességű grid modellnél jóval kevesebb pontot is jelenthet. A háromszöglapok csúcsainak kiválasztásához azonban bonyolult algoritmusokra van

szükség, és a modellben természetesen tárolni kell a pontok koordinátáit is és az élek topológiáját (amire a grid esetén, annak szabályossága miatt nincs szükség).

2.5 A digitális domborzatmodellek felhasználási területei

A 2.3-as pontban ismertetett klasszikus domborzatábrázolási módszerek mellett a digitális domborzatmodellek tekinthetők egy újfajta, korszerű domborzatábrázolási típusnak, bár önmagukban inkább „csak” számítógépes adatkezelési módszerek, hiszen magát az ábrázolást már a számítógép végzi el a DDM-adatok és az általunk tett vizuális beállítások alapján. A beállításoknak széles skáláját kínálják a különféle szoftverek, így a klasszikus módszerekhez képest hihetetlen lehetőségeket adnak a megjelenítésben.

A digitális domborzatmodellek további nagy előnye, hogy könnyen programozhatók olyan algoritmusok, melyek a modellfelület tetszőleges sűrűségű pontjaiban a környező ismert pontokból interpolálva kiszámítják a helyi elemi síkdarabka meredekségét és dőlésirányát. Ezek felhasználásával például egy fény-árnyék intenzitási értéket rendelhetünk a ponthoz, így pillanatok alatt árnyékolásos ábrázoláshoz juthatunk; a dőlésirány felhasználásával pedig kitettségi térkép készíthető. Könnyedén számítható még a görbültség is. Ezeket a lehetőségeket összefoglalóan a DDM-ek *elemi szolgáltatásainak* nevezzük.

A DDM-ek komplex szolgáltatásait – mint például a perspektivikus megjelenítést, térfogatszámítást, összeláthatóság-vizsgálatot stb. – széles skálán alkalmazzák térbeli döntéselőkészítések során. A domborzatmodellek elemzésével megállapíthatók egy terület vízrajzi jellemző vonalai (vízválasztók, völgyvonalak, vízgyűjtő területek). Meghatározható építőmérnöki vagy építészeti alkalmazásokban a szükséges földmunka mértéke, helye. Tájtervezési szempontok figyelembe vételéhez a DDM-re illesztett ortofotó, vagy felszínborítási adatok – és az így létrejövő tájmodell - biztosítanak nagy segítséget például egy létesítmény tájba illesztéséhez. Alkalmazható a mezőgazdaságban, például a növények igényének megfelelő mikroklímájú területek leválogatásában. Geológiai és geofizikai elemzésekhez a terepfelszín morfológiájáról nyújthat rengeteg, egyébként nehezen megjeleníthető adatot. [Zentai 2000]

A DDM-ek nélkülözhetetlen szerepet töltenek be ortofotók készítésekor a légifényképek automatizált digitális képátalakítása során.

3. Az alkalmazott domborzatfelmérési technológiák bemutatása

3.1 A LiDAR technológia

A LiDAR az angol Light Detection And Ranging – fényérzékelés és távmérés kifejezésből származik, lényegében lézerletapogatást, lézerszkennelést jelent. A RADARhoz hasonló elven működik, de a rádióhullámok helyett az infravörös vagy a látható fény tartományát használja az elektromágneses spektrumnak. A lézerszkennер egy fénynyalábot bocsát a tárgyra, és érzékeli a róla visszaverődő fényt, méri a visszaverődési időt, így a fénysebességből képes meghatározni a tárgy távolságát. A sugár vízszintes és magassági szögértékeinek ismeretében kiszámítható a mért pont térbeli koordinátája a műszer helyi koordinátarendszerében. A mai modern műszerek képesek ezt a műveletet másodpercenként akár százezres nagyságrendben végezni. A lézersugarat egy gyorsan forgó tükörrel irányítva egy tetszőleges térrész nagy felbontásban, gyorsan felmérhető. A rendszer földi felméréseknél és repülőgépre szerelve egyaránt használható.

A légi LiDAR-rendszerek típustól függetlenül az alábbi összetevőkből állnak:

- *GPS-rendszer*, mellyel a repülőgép (egy pontjának) pozícióját mérik. A pontos helymeghatározáshoz rendszerint valamilyen utófeldolgozós-kinematikus megoldást alkalmaznak.
- *Inerciális mérőegység (IMU)*, mellyel a repülőgép (és vele együtt a lézerszkennер) három tengely körüli elfordulásait mérik (pitch, roll, yaw – elfordulás, bólintás, legyezőmozgás).
- *Lézerszkennер-egység* irány- és távmérési képességgel.

A légi lézerszkennelés tehát egy relatív felmérési módszer, amelynek a vonatkoztatási rendszere ráadásul folyamatosan változik, emiatt csak az abszolút pozíció- (GPS) és elfordulásadatok (IMU) felhasználásával kaphatunk értékelhető eredményt.

A légi LiDAR alkalmazásokat a terület kiterjedése alapján két részre bonthatjuk:

A nagy kiterjedésű (wide area) és a sávszerű (corridor) alkalmazásokra. Előbbire példa a dolgozatom témájaként megjelölt domborzatfelmérés, utóbbira a vonalas létesítmények, például utak, vasutak, vezetékek nyomvonalának mérése.

A nyers mérési eredmények feldolgozása a rengeteg adat miatt nehézkes. A berendezés ráadásul képes egy kibocsájtott fényimpulzus többszörös visszaverődéseit is regisztrálni, ugyanis ugyanabból a nyalábból a fény visszaverődhet (például egy erdő felett) a lomb tetejéről és a föld felszínéről is. Így általában legalább két kimenetet szokás készíteni a kiértékeléskor, egyet az első visszaverődésekből (first echo) egyet pedig az utolsó visszaverődésekből (last echo). Az első visszaverődések a repülőgéphez legközelebbi felszínről, az utolsó visszaverődések a legtávolabbi felszínről közvetítenek adatokat, ezért előbbi felszínmodell, utóbbi domborzatmodell készítésére alkalmasabb.

A mérés összetevőinek hibái:

Lézeres távmérés hibája: 2-3cm

GPS helymeghatározás hibája: 5-10cm

IMU hibája: ~10cm/km

A legtöbb ezzel foglalkozó cég 15-18 cm-es magassági és 50 cm-es vízszintes pontosságot jelöl meg a műszaki paraméterek között. [Blaschke, 2011.]



7. ábra

Salzburg belvárosának három dimenziós modellje
1 pont/m²-es felbontású LiDAR felszínmodellből
és a textúraként ráillesztett Quickbird nagyfelbontású műholdképből

Forrás: Universität Salzburg, Zentrum für Geoinformatik

3.2 A GNSS technológia

A GNSS az angol Global Navigational Satellite System – Globális Navigációs Műholdrendszer kifejezés rövidítése. Ez összefoglaló név, és bár legismertebb és legszélesebb körben használt tagja az amerikai GPS (Global Positioning System) magában foglalja a már régóta üzemelő orosz GLONASS, és a még épülő kínai Compass/Beidou illetve európai Galileo rendszereket is. Felméréseim során én a GPS rendszert használtam, ezért a továbbiakban ezen keresztül ismertetem a GNSS technológia lényegét.

A műholdas helymeghatározó alaprendszerek közepes földkörüli pályán (GPS esetén ~20 000 km) keringő kb. 30 műholdat tartalmazó műholdas és a földi követőállomásokból összetevődő vezérlő alrendszerből állnak. Ehhez csatlakozhatnak még a földi alapú (GBAS) és a műholdalapú (SBAS) kiegészítő rendszerek, melyek az alaprendszer pontosabbá tételét végzik. Valamint ide soroljuk még a felhasználók rendszerét is.

A helymeghatározás elve, hogy a műholdak által sugárzott, kódolt mérőjelekből és a műholdak ismert pályadataiból a felhasználó vevőkészüléke képes meghatározni saját távolságát a műholdaktól. Ha egy időben legalább 4 műhold jelét észleljük, abból meghatározható a geometriai hely a rendszer által használt geocentrikus, derékszögű koordinátarendszerben.

A műholdak által sugárzott egyik, C/A kódnak nevezett jel egy műholdanként változó, körülbelül milliszekundumonként ismétlődő, 1023 bit hosszúságú bináris minta, melyet a vevő beazonosít, összehasonlítja a többi holdról érkező mintával, és meghatározza azt az időt, amely ahhoz kellett, hogy a jel eljusson az egyes műholdaktól a vevőig. Így a távmérést időmérésre vezeti vissza. Ezt az időt kb. százmilliomod másodperc pontosan képes meghatározni, ami a fény terjedési sebességéből következően körülbelül 3 méteres nagyságrendbe esik. Ideális esetben ez az elérhető legnagyobb pontosság. Ezt a meghatározási módszert hívják *abszolút helymeghatározásnak*, a mérési módszert pedig *kódmérésnek*, és a navigációs vevők (mint a későbbiekben bemutatott saját készülékem) erre képesek.

A jóval drágább geodéziai célú vevők már a jelet vivő rádióhullám fázisállapotát is képesek meghatározni, ezzel akár centiméter alatti pontosság is elérhető. Ehhez azonban

még szükség van egy közeli ismert koordinátájú (referencia) ponton elhelyezett másik vevőre, mellyel a pont ismert koordinátái és a ponton fázisméréssel meghatározható koordináták különbségét mérjük, ugyanis ezek az értékek néhány tíz kilométeres körzeten belül állandónak tekinthetők, így a mozgó (felmérést/kitűzést végző) vevőre ugyanúgy hatnak. A különbséget főleg légköri hatások okozzák. Ebben a koncepcióban az ismert ponton lévő vevőt *bázisnak*, a mozgó vevőt *rovernek* nevezzük.

A bázisvevő használatát teszi szükségtelemmé az aktív GNSS hálózat, mely az országban több helyen fixen telepített permanens állomásokból áll. Ezeknek a szerepe a bázisvevőével azonos, de a mért adatokat központilag gyűjtik és tárolják, ahhoz díjfizetés ellenében bárki hozzáférhet. A rendszer továbbfejlesztése során ma már nem csak egy adott (a mérés helyszínéhez legközelebb lévő) permanens állomás adatait lehet használni, hanem a mérési hely közelében kiválasztott tetszőleges pontra vonatkoztatva, a környező permanens állomások adataiból interpolált korrekciós adatok is letölthetők. Ezt a módszert nevezzük virtuális referencia segítségével történő mérésnek. Én ezt az eljárást alkalmaztam.

3.3 A topográfiai felmérés

A topográfiai felmérés során azt a technológiát értem, amelyet a Kar topográfiai terepgyakorlatain alkalmazunk. Ez a klasszikus, informatikai forradalom előtti időkből származó felmérési módszer, mely annyival van egyszerűsítve, hogy a mért pontok távolságát és magasságkülönbségét mérőállomás távmérő funkciójával határozzuk meg. Ezen kívül mérőasztal-felszerelés és távcsöves vonalzó áll a hallgatók rendelkezésére. Részletesen a feladatléírással együtt, az 5.2.4-es pontban ismertetem.

3.4 Az SRTM felmérés

Az SRTM, Shuttle Radar Topography Mission, az Egyesült Államok űrkutatási hivatalának (NASA) és Földtani Szolgálatának (USGS) vállalkozásában valósult meg. Célja a Föld felszínének radaros telemetrián⁴ alapuló domborzatfelmérése. A méréseket 2000 februárjában végezték az Endeavour űrrepülőgéppel, SAR (szintetikus apertúrájú radar) berendezéssel. Ez a berendezés két radaregységet használ, melyből az egyiket az űrsiklón, a másikat egy abból 60m-re kinyújtható karon helyezték el. A felmérés 11 napig tartott (a feldolgozás másfél évig), ezalatt a D. sz. 57°-tól az É. sz. 60°-ig felmérték a teljes bolygó szárazföldjeinek domborzatát. Az eredményeket 2003-ban ingyenesen elérhetővé tették az USA területén 1'' x 1'' -es, a világ többi részén 3'' x 3''-es felbontásban. Ez Magyarország területén kb. 93 méteres észak-déli és kb. 63 méteres kelet-nyugati irányú felbontást jelent. Egy pontra tehát körülbelül 6000 m²-nyi terület jut, így az országról egy hozzávetőlegesen 16 millió pontból álló domborzatmodell áll ingyenesen a rendelkezésünkre.

(forrás: http://sas2.elte.hu/mg/foldkutatas_v3/11radar3srtm.htm)

⁴ Radaros telemetria = rádióhullámok segítségével végzett távmérés

4. A Barometrikus elvű felmérés ismertetése

A 3. pontban felsorolt módszerek mellett egy ötödik, saját módszer kidolgozását is elvégeztem – kísérleti célból. Ez a módszer a barometrikus elven történő magasságmeghatározást alkalmazza a domborzatfelmérésben.

Az ötletet az adta, hogy néhány évvel ezelőtt beszerzett **Garmin eTrex Vista HCx** típusú kézi navigációs GPS-vevőm rendelkezik légnyomásmérő funkcióval, aminek segítségével képes relatív (egy kezdeti beállításhoz viszonyított) magasságot számítani, és ezt az értéket hozzárendelni a GPS-mérésből meghatározott vízszintes koordinátákhoz. Ezzel való kísérletezéseim során merült fel bennem, hogy elképzelhető-e, hogy az így mért pontok alkalmazhatók legyenek domborzatmodellezésre. Tekintettel arra, hogy a készülékem barométere (nyugodt körülmények között és rövid távon) nagyjából fél – egy méter körüli pontossággal képes magasságmeghatározásra, feltételeztem, hogy ha nem is precíziós célokra, de bizonyos alkalmazásokra megfelelő modell állítható elő vele.

A tényleges lökést az adta, hogy egy ismerősöm azonos típusú készüléket vásárolt, így azt kölcsönkérve sokféle előzetes elemzést végezhettem, ami a későbbiekre nézve hasznos tapasztalatokat eredményezett. A későbbi mérések során is ezt a két készüléket használtam. (A mellékletekben „AKOS” megnevezéssel utaltam saját, „ABEL” megnevezéssel ismerősöm készülékére.)

Azt a célt kívánom elérni, hogy egy – anyagi és eszközbeli szempontok tekintetében – könnyen hozzáférhető lehetőséget teremtsék a domborzatfelmérésben, amely gyengébb pontossági igényrel beérő alkalmazások számára reális alternatívája lehet a már ismert módszereknek. A későbbiekben bemutatásra kerülő kísérletek során megismerve a műszer képességeit és az időjárási hatásokat, a méter körüli pontosság elérését tartanám ideálisnak magassági értelemben.

4.1. A barometrikus magasságmeghatározás elve

A földi légkörben vertikális irányban a légnyomás értéke változik, ahogyan változik a vizsgált szint fölött lévő légoszlop tömege. Ennek oka a Föld gravitációjának a levegő részecskéire gyakorolt hatása. A légnyomás függőlegesen felfelé haladva exponenciálisan csökken. A csökkenés tehát függvénye a magasságnak, amit kihasználva a mért légnyomáskülönbségből számítható a magasságkülönbség. Ha ismerjük egy pont magasságát, és ebben a pontban megmérjük a légnyomást, majd egy ismeretlen magasságú pontban ismét megmérjük a légnyomást, a két érték különbségét felhasználva kiszámíthatjuk az ismeretlen magasságot. Az összefüggést a barometrikus formula adja meg:

$$P_h = P_0 \cdot e^{-\frac{Mg\Delta h}{RT}}$$

ahol: P_h = légnyomás az ismeretlen pontban, Pa

P_0 = légnyomás a referenciapontban, Pa

M = levegő átlagos mólótömege: 0,028965 kg/mol

g = gravitációs gyorsulás: 9,81 m/s²

Δh = a referenciaponthoz viszonyított magasságkülönbség, m

R = egyetemes gázállandó: 8,3145 J/(molK)

T = levegő hőmérséklete, K

(forrás: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/barfor.html>)

Ebből Δh -t kifejezve kapjuk az általunk használandó explicit képletet, melynek segítségével a két légnyomásértékből számítható a magasságkülönbség.

$$\Delta h = -\ln\left(\frac{P_h}{P_0}\right) \cdot \frac{RT}{Mg}$$

A képlet alapján számítható, hogy a normál légköri nyomás környékén (~100 kPa) és tengerszint felett 1000m-ig 1m magasságkülönbség ~12Pa, vagyis ~120 PPM

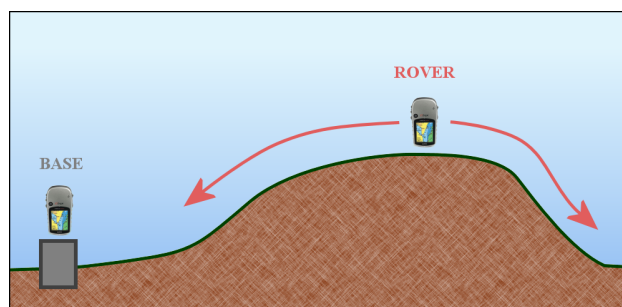
nyomáskülönbséggel jár, ugyanakkor ez az érték függ még egy változó mennyiségtől: a levegő hőmérsékletétől. 20°C környékén ez a hatás °C-onként 0,3%-nyi nagyságrendű eltérést okoz a nyomáskülönbségben, mely már szignifikánsnak mondható. Ez a képlet továbbá csak izoterm és homogén légkörben, ideális körülmények között helytálló, ezért számos korrekció válhat szükségessé.

Az általam használt műszer ilyen irányú felkészítettségéről nincs információ, a pontos számítási algoritmus valószínűleg „fekete doboz”: üzleti titok is. A műszer azonban hőmérsékletet nem mér.

Egy másik nagyon fontos hatás az időjárás által befolyásolt légnyomásváltozás, vagyis az a tény, hogy a légkörben lejátszódó folyamatok következtében egy fix pontban is folyamatosan változik a nyomás. Ezt a hatást igyekeztem kiküszöbölni a következőkben bemutatott módszeremmel.

4.2 A mérési módszerem megalapozása, műszervizsgálat

A mérési eljárásom alapja a GPS-mérések terminológiájából megismert bázis-rover viszony alkalmazása két, barométerrel ellátott navigációs GPS-vevővel. Az ötlet az, hogy az egyik vevőt bázisként használva csak magasságértékek rögzítésére állítom be. Ezt a vevőt a mérés ideje alatt állandó helyre telepítem. A másik vevőt pedig roverként a terepen végigvezetem, közben a tracklogban rögzítem a koordinátákat és a hozzá tartozó magasságértékeket is. (8. ábra) A mérés elején azonos pontban mindkét műszer magasságértékét azonos (tetszőleges kerek, de a valósághoz közeli) értékre kalibrálom. A feldolgozás során a bázisvevő kiindulási értékhez képesti változásaiból számított javítással korrigálom a rover által mért magasságokat.



8. ábra

A barometrikus felmérés műszerelrendezésének szemléltetése

A feltevésem kipróbálására és tapasztalatszerzés céljából több kísérleti mérést végeztem. Ezekről az összegyűjtött tapasztalataimat az alábbiakban ismertetem, a részletes táblázatok digitális formában megtalálhatók a DVD-melléklet *Barometrikus magasságmérő teszt* nevű mappájában. (A dolgozatomban nem az összes kísérletet ismertetem, ezért a számozás nem folytonos.)

1. számú kísérlet: statikus együttes mérés

A két készüléket 12 órán keresztül azonos helyen, szobában tárolva a magasságok 10 másodpercenkénti rögzítésére állítottam be. (Később átállítottam 30 másodpercre.) A mérés elején a magasságokat azonos értékre kalibráltam. A mérés célja annak vizsgálata volt, hogy a két műszer egymáshoz képest, azonos körülmények között, nyugalomban végzett mérései mennyire térnek el egymástól. A tapasztalataimat diagramban összegeztem, mely a IV. mellékletben látható.

Arra az eredményre jutottam, hogy a különbségadatoknak van egy nagyjából 30 centi középhibájú zaja, valamint felfedezhető egy nagyobb léptékű trend, mely szerint egy kezdeti 1-2 óráig tartó csillapodási fázis után a különbségek mozgóátlaga egy állandó értékre áll be. A csillapodási fázis során (különösen annak legelején) a különbség azonban jelentősen változhat. Az első néhány percben megfigyelhető, jelentősebb változást nevezem a továbbiakban *kezdeti szétugrásnak*. Ez néhány métert is elérhet, ami az általam elvárt pontosságot már túllépi. Ezért alkottam meg azt a szabályt, hogy a majdani mérések elején egy legalább 10-15 percig tartó statikus együttes észlelést kell végezni, *hogy a kezdeti szétugrás mértéke meghatározható legyen*.

3. számú kísérlet: dinamikus együttes hosszú idejű mérés

A két készüléket egy két napos túrára vittem el, ahol mindkét készülék végighaladt a túra útvonalán 20 másodpercenkénti rögzítéssel. A túra során az egyik készülék a hátizsák felső zsebében volt, a másik készüléket a kezemben tartottam – körülbelül fél méterrel lejjebb. A magasságértékeket mindkét túra elején összekalibráltam. A mérés célja ezúttal annak vizsgálata volt, hogy a két műszer egymáshoz képest, azonos körülmények között, de mozgás, rázkódás, szél hatásának kitéve végzett mérései mennyire térnek el egymástól. A tapasztalataimat az V. mellékletben látható diagramok szemléltetik.

A különbségekben mutatkozó zaj mértéke nem sokat változott, némileg rapszodikusabbak lettek viszont a hosszabb távon mutatkozó ingadozások. Értékei egy

durván 3 méteres intervallumban mozogtak. Bár a hatásokat teljes körűen nem vizsgáltam, a túra utáni vonatút során az egyik készüléket az ablakon néhány percig kitartottam, ezzel modellezve az élénk szél hatását. Mintegy 1 méteres különbségváltozást eredményezett, de később visszaállt a korábbi értékre. Ez alapján a szél hatása nem mondható olyan jelentősnek, hogy az a mérést értékelhetetlenné tegye.

4. számú kísérlet: dinamikus együttes rövid idejű mérés

A két készüléket a Kaposvár-Fonyód vasútvonal végigutazása alatt 1 másodperces rögzítési időközre állítottam, a mérés elején a két magasságértéket összekalibráltam. A mérés eredményében a különbségek változásaiban korrelációt fedezhetünk fel a tengerszintfeletti magassággal, bár lehet, hogy ez valójában csak a kezdeti szétugrás és az utána következő csillapodás hatása, ami a rövid ideig tartó (másfél óras) mérésben még jelentősebb. A változás intervalluma 2 méter tágas.

6. számú kísérlet: statikus, külön helyű mérés

Ebben a kísérletben a két készüléket az 1. kísérlethez hasonló körülmények közt, de egymástól 1,5 km távolságban helyeztem el (közel azonos magasságban). A kísérlet célja, hogy megfigyeljem a légköri nyomásváltozás távolság okozta különbségeit azért, hogy megtudjam, használható-e a tervezett módszer nagyobb területek felmérésére, ahol a két készülék egymástól távol kerül. A mérés kezdetén, egy ismerősöm segítségével, azonos időpillanatban azonos magasságra kalibráltuk a magasságmérőket.

Azt tapasztaltam, hogy ekkora távolságon a magasságértékek különbsége egy 4 méteres intervallumon belül ingadozik. Ez, bár jelentős, mégis az a véleményem, hogy a mérés sikerét nem veszélyezteti, amennyiben annak során a két készülék nem távolodik el egymástól néhány száz méternél jobban.

4.3 Pilot projekt, méréstervezés

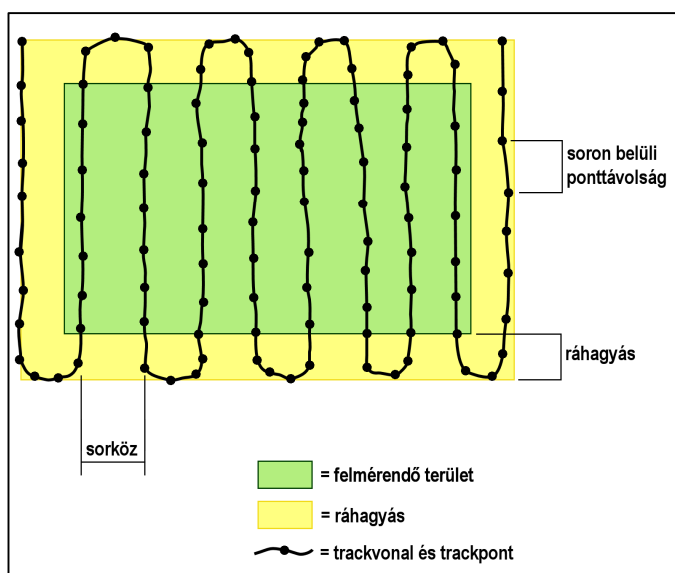
A kísérletek tapasztalatait felhasználva egy pilot projekt véghez viteléről döntöttem, aminek kapcsán kidolgoztam a mérések általános tervét, és ki is próbáltam a gyakorlatban, ez alapján pedig kidolgoztam a mérés végrehajtásának részletes szabályrendszerét.

4.3.1 A pilot projekt

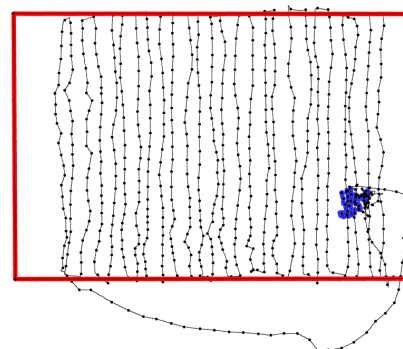
A pilot projektre munkaterületnek a kaposvári Városligetben lévő szánkódombot magában foglaló, 100x130m-es téglalap alakú területet választottam ki. Az előkészítés során a területet a 100m-es oldallal párhuzamos sorokra osztottam, a sortávolságot 5 m-esnek választottam. Könnyebbé teszi, hogyha a tervezett sorokat előre megszerkesztjük a készülékhez tartozó szoftverben (MapSource), és feltöltjük a készülékre, így mérés közben követni tudjuk, és nem térünk le róla, nem keresztezzük saját korábbi utunkat, nem tájolódnak el, és az előre elvárt szabályos sűrűségű pontthalmazt kaphatjuk.

A sorok tervezésénél figyelembe kell venni, hogy később csak úgy tudunk interpolációt végezni a felméréendő terület bármely pontjára, ha a mért pontok konvex burka teljesen lefedi a felméréendő területet. Ehhez szükség van arra, hogy a terület minden oldalán megfelelő ráhagyással mérjünk, és különösen ügyeljünk a sarkokra.

A GPS-ben a rögzítési időközt 3 másodpercenkéntire állítottam. Ez azt jelentette, hogy a haladási sebességet figyelembe véve átlagosan minden 5x5 méteres négyzetre jut egy pont. A sorokat bejárva nagyjából 2,7 km-t tettem meg, amihez 35 percre volt szükség. A kalibrálással és nyugalmi állapottal együtt durván egy óra volt a projekt időigénye. A felmérés sémáját a 9. ábra, a végrehajtott mérés nyomvonalát a 10. ábra szemlélteti.



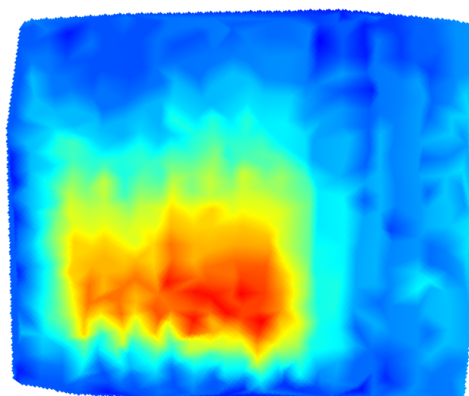
9. ábra



10. ábra

A barometrikus felmérés sémája és a pilot projektben végrehajtott mérés nyomvonalát

A kiolvasott mérési eredményeket Excel táblázatkezelő programmal dolgoztam fel. A kimenetként kapott koordinátákra és magasságokra Quantum GIS szoftverben felületet interpoláltam. Bár a mérésem minőségvizsgálatához nem állt rendelkezésemre referenciaadat, a felület egy nagyon jellemző szabályos hibát mutatott: Az „oda” és „vissza” sorok magasságai egymáshoz képest fűrészfogszerűen elcsúszva jelentek meg:



11. ábra

A pilot projekt eredményeként létrehozott domborzatmodell

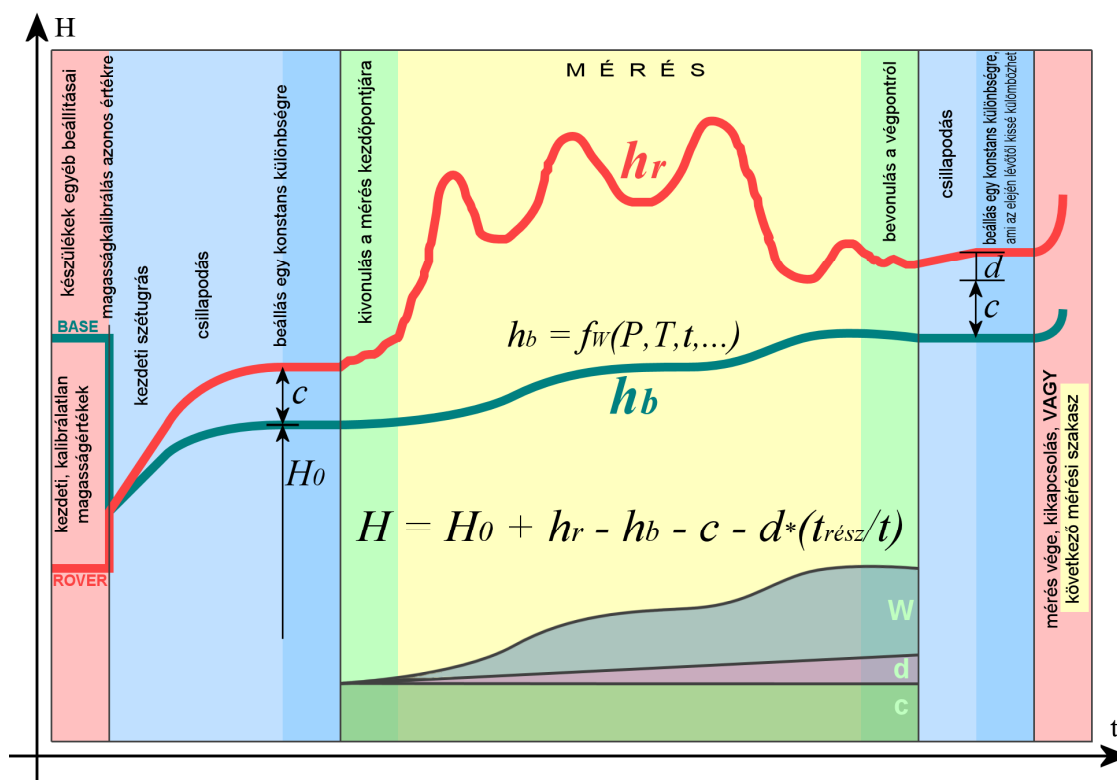
Ezt a hibát a GPS készülék „tehetetlenségének” tudtam be. Feltételezésem szerint a műszer barométere lassabban reagál a változásokra, és néhány másodperc késéssel veszi fel csak a helyes értéket. Így a készülék viszont a GPS által valós időben meghatározott ponthelyhez a még nem oda tartozó magasságot rögzíti. Ezt a hatást számítással részben ki lehetett küszöbölni: a pontok koordinátáit a pontban mért sebesség arányában, és a megelőző pont helye irányában el kell tolni. Az eltolás sebességarányának változtatásával megkereshető a „legsimább” modell, melyet már el tudunk fogadni.

A tapasztalatokat a digitális mellékletben Barometrikus felmérés - pilot projekt.pps fájlneven megtalálható PowerPoint bemutatóban összegeztem.

4.3.2 A mérési folyamat szabályrendszere

A pilot projekt tapasztalatait felhasználva megalkottam azt a mérési eljárást és szabályrendszert, amellyel a legtöbb szabályos hibaforrás kiküszöbölhető.

A mérési folyamatot a 12. ábra szemlélteti:



12. ábra

A barometrikus mérés folyamata és a magasságszámítás elve

Első lépésben a munkaterület belsejében kiválasztunk egy biztonságos, szélvédett helyet, ahová a bázisvevőt telepítjük. Bekapcsolás után a készülékeken (mindegyiken!) az alábbi beállításokat tesszük:

- Trackek/Beállítások/Rögzítési mód: idő alapú, n másodpercenkénti.
n értékét mi választjuk meg, én 3 másodpercet használtam. Természetesen ne felejtjük el ellenőrizni, hogy a készülékeken a rögzítés be van-e kapcsolva
- Beállítások/Mértékegységek/Magasság (Függ.seb.): Láb (láb/perc)
erre azért van szükség, mert az adatokat lábban rögzítve nagyobb élességgel kapunk adatokat, mintha méterben rögzítenénk. (1 láb = 0,3048 m)

A két vevőt egymás mellé helyezzük, és a magasságértékeket azonos értékre állítjuk a magasságmérő Magasság kalibrálás menüpontjában. Ezután a két műszert nyugalomban hagyjuk észlelni – ahogy időnk engedi – legalább tíz percig. Ez alatt lejátszódik a kezdeti szétugrás (amit valószínűleg a műszer gombjainak nyomogatása, műszerek közti konstrukciós különbség, hőmérséklet-különbség stb. okozhat). Jó esetben ez nem lesz több néhány lábnál. A fenti ábrán ezt az értéket jelöltem c -vel.

Amint úgy látjuk, hogy a különbség egy konstans értéket vett fel, elkezdhető a mérés. Ennek során a bázisvevőt végig teljes nyugalomban hagyjuk, a rovernek használt műszert pedig a kezünkben tartva, de a lehető legkevesebb erőhatásnak kitéve haladjunk végig a terepre megtervezett útvonalon.

A mérés ideje alatt a bázisvevő által mért magasságokban (h_b) csak az időjárás-változás hatása érvényesül. Ezt jelöltem az f_w „időjárásfüggvénnyel”. A rover vevő mért magasságaira (h_r) a domborzat magasságváltozásai miatti légnyomás és az időjárás okozta légnyomásváltozás együttesen hat. A két érték különbségével tehát ki tudjuk ejteni az időjárási hatást.

A mérés végeztével visszatérünk a bázisvevőhöz, és egy újabb, 5-10 perces csillapodási periódus után megvizsgáljuk a két műszer által mutatott magasságkülönbséget. Ez nem lesz azonos a kezdeti c értékkel, de néhány lábnál nem lehet több az eltérés. Ezt a c -től való eltérést az ábrán d -vel jelöltem.

A kezdeti szétugrás $\sim c$ mértékét ismerjük, ezt csupán ki kell vonni.

Mivel a mérés közbeni különbségváltozásokra nincs ellenőrzési lehetőségünk, ezért a végén tapasztalt d eltérés javítását időarányosan–lineárisan ($t_{rész}/t$) osztjuk rá a mért magasságokra.

Nem szabad elfeledkeznünk a műszermagasság levonásáról sem. Ezt kézben tartott készülék esetén én 4 lábnak vettem.

Végül az így kapott, javított relatív magasságokhoz hozzá kell adni a kezdőpont ismert H_0 abszolút magasságát. Ennek meghatározásához – hacsak nincs a közelben egy ismert magasságú pont – kénytelenek vagyunk a készülék által felkínált GPS-magasságból megadni. Ehhez sok mérést végezzünk, hiszen a GPS-magasság navigációs pontosság esetén még ideális körülmények (nyílt terület, jó rálátás a műholdakra, ideális műhold-geometria, EGNOS pontosítás) esetén is csak néhány méteres pontosságú. Ha megelégszünk egy relatív magasságértékekből készített modellel, akkor ez a probléma nem áll fenn.

Méréstervezési segédletként készítettem egy Excel táblázatot, melyet a digitális mellékletek között méréstervezés.xls néven lehet megtalálni. Segítségével a felméréendő terület méretei és a méréstervezési paraméterek (sorköz, ráhagyás, soron belüli ponttávolság, haladási sebesség) alapján megkapjuk a méréshez szükséges időt, a bejárando hosszát, a pontok számát, az átlagos pontsűrűséget, valamint egy egyszerű árkalkulációt is.

4.4 Egy gyakorlati alkalmazás

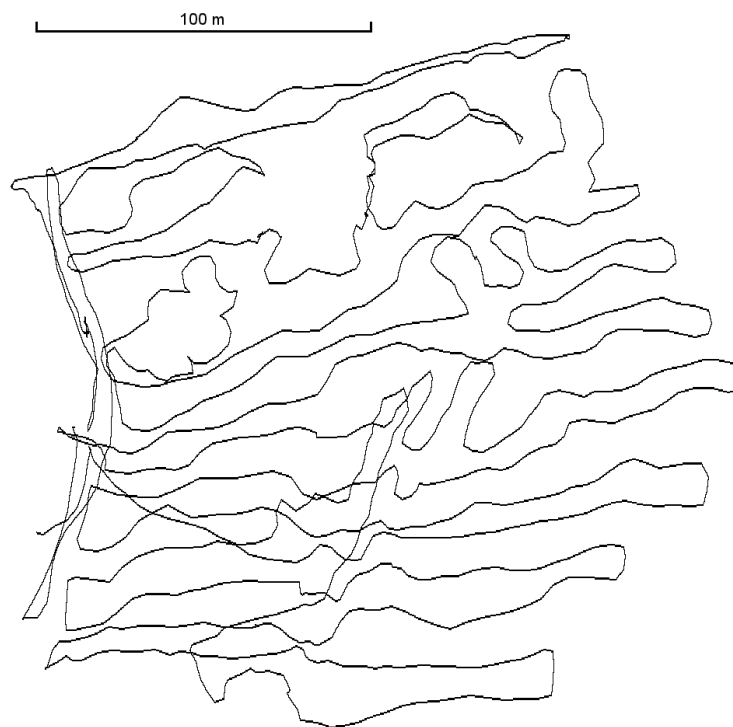
A módszer alkalmazhatóságát az elmélet és a kísérlet után egy gyakorlati alkalmazásban teszteltem. Egyik ismerősöm építész hallgatóként tanul a Pécsi Tudományegyetemen, és szintén ebben az évben készítette diplomatervét. Feladata egy új épületcsoport tervezése volt, melyhez szüksége volt domborzatmodellre, pontosabban szintvonalrajzra a telepítés helyszínéről. Egy beszélgetésünk során felmerült az ötlet, hogy az ő diplomatervéhez az én módszeremmel készítsünk felmérést, így tulajdonképpen félüzemi körülmények között tesztelhettem a módszert.

A helyszínnek a Kaposvár melletti Deseda-tó egyik partszakaszát választottuk, ahol a vízisporttelep is található. Az építészeti diplomatervben egy új kajakosház, valamint az ehhez tartozó szállásépületek létesítése szerepelt – a terep adottságainak és a táj adta lehetőségeknek minél jobb kihasználásával. Mivel viszonylag kicsi, de változatos domborzatú (és növényzetű) területről volt szó, a terület tanulmányozása után ismerősöm szembesült azzal a problémával, hogy a nála meglévő helyszínrajz által jelölt szintvonalak nem fedik a valóságot, elnagyoltak, a telepítéshez szükséges terepjellemzők felismerhetetlenek rajta.

Ismerősöm elmondása szerint a tervezési terület keleti oldalán húzódó kettős részsű, valamint a nyugat felé egyre gyengébben lejtő tisztás felmérésére egyedül nem tudott volna megoldást találni, így nagyon jó és egyszerűen megvalósítható ötletnek tűnt a barometrikus domborzatfelmérési módszer. A feldolgozás után (melynek eredményéül a Surfer program demó verzió volta miatt csak egy raszterképet tudtam exportálni) egy olyan szintvonalrajzot készítettem, melyen a méterenkénti szintvonalak már jól kirajzolták a terület valós domborzati viszonyait. Ezt ő – raszterréteggént – kiindulási alapnak használta, később rátranszformálva a saját, vektoros formátumú tervére.

Összevetve az eredetileg hozzáférhető helyszínrajzával, kiderült, hogy a terület domborzati képe nagyvonalakban megfelel annak, de részleteiben nem sokat árult el belőle, így a módszeremmel készült felmérés számára igen hasznosnak bizonyult.

A felmérés külön érdekessége, hogy ez alkalommal csak a saját készülékem állt rendelkezésre. Ezt úgy oldottam meg, hogy a terület nyugati határát képező tóparton – szintben – végigfutó műút abszolút magasságát (az eredeti helyszínrajz szintvonalalaiból és többszöri GPS magasság mérésével) meghatároztam, és a feldolgozás során az utat érintő pontok magasságértékeit vizsgálva az eltéréseket lineárisan ráosztottam a terület belseje felé húzódó sorokban lévő pontokra. Egy oda-vissza sor megtétele körülbelül 5-10 percet vett igénybe, ezalatt az időjárásváltozás hatását lineárisnak vehetjük. A terület további érdekessége, hogy itt-ott sűrű növényzettel borított, sőt helyenként vizenyős, így nem lehetett szabályos sorokat bejárni rajta. A felmérést 2012. március 15-én végeztük, mikor az aljnövényzet még fejletlen és a fák lombtalanok. A felmért terület mérete ~3 ha volt.



12. ábra

A 2012.03.15-ei deseda-parti felmérésem nyomvonala

5. A feladat végrehajtásának leírása

5.1 A mintaterület bemutatása

Mintaterületem a Keleti-Bakony peremén, a Baglyas-Iszka hegycsoport fennsíkján, a Csórtól 3 kilométerre Északra fekvő Leányvágó és Gomba-hegy térségében található. A fő kőzetalkotó a triász kori dolomit, melyet a környék két kőbányájában is kitermelnek. A felszín a lepusztulás következtében változatos, helyenként hosszú, mély szárazvölgyek – helyi nevükön *horgok* – vágódtak a hegyoldalba. A talajtakaró vékony, rajta jellemzően sziklagyepek, lejtősztyepppek alakultak ki. Foltokban még tölgyesek és fenyvesek találhatóak. A környék évtizedekig a bakonyi honvédségi gyakorlóterülethez tartozott, ennek nyomaként helyenként tankállások, lövészárkok, betonbunkerek találhatók.

A terület kiválasztásának szempontjai – a bevezetőben említettek mellett – a következők voltak:

- egybefüggő, téglalap, vagy négyzet alakú legyen
- oldalai párhuzamosak legyenek az EOVS⁵ rendszer koordinátatengelyeivel
- a teljes terület bejárható legyen, ne legyenek rajta erdősült vagy sűrű bozótos területek és járhatatlan, szakadékos részek
- mind a topográfiai terepgyakorlat, mind a LiDAR felmérés adatai fedjék le

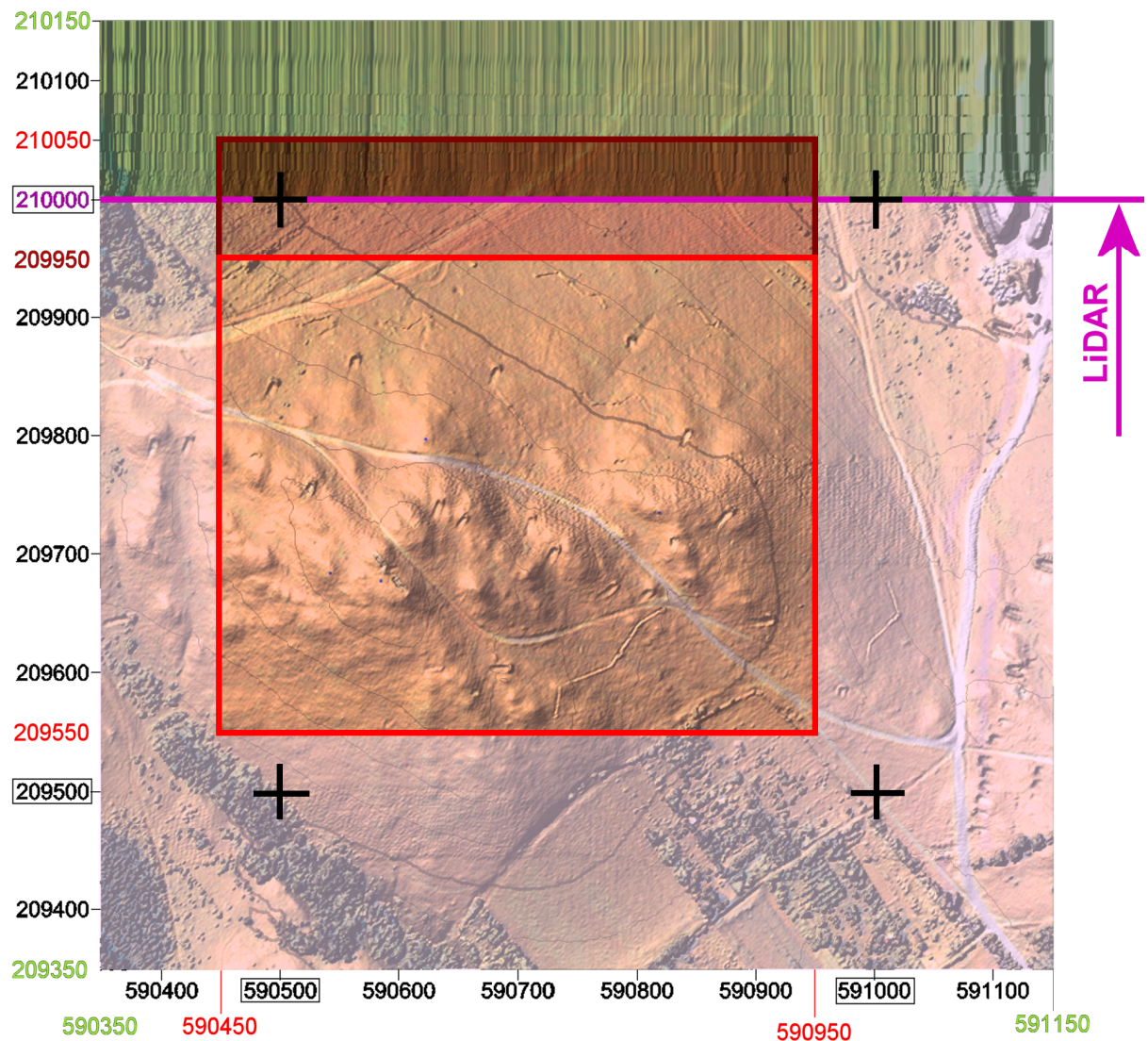
Ezen kritériumoknak megfelelő terület a Gomba-hegy környékén lett kijelölve. Eredetileg 500x500 m kiterjedésűnek választottam, de a terület északi részének jellegtelensége, északkeleti sarkának fiatal erdővel borítottsága és a rendelkezésemre bocsátott LiDAR állományból való 50m-nyi kilógása miatt a felső 100 métert elhagytam, így alakult ki a végleges kiterjedés: Ny-K-i irányban 500m, É-D-i irányban 400m.

A terület sarokpontjainak EOVS koordinátái:

$Y_{\min} = 590450$	$Y_{\max} = 590950$
$X_{\min} = 209550$	$X_{\max} = 209950$

A területet és környékét ábrázoló domborzatárnyékolásos ortofotó található az I. mellékletben. Ebből egy ortofotó-minősítéssel levezetett síkrajzú és LiDAR adatokból származó domborzatrajzú tájfutótérképet készítettem, mely a II. mellékletben található. A következő kép pedig a mintaterület elhelyezkedését mutatja be az EOVS rendszerben.

⁵ Egységes Országos Vetület, a magyar állami alaptérképek vetületi és koordinátarendszere



13. ábra

A minteterület elhelyezkedése az EOVS rendszerben

M=1:6000

Az előzetes terület a 210050-es X koordinátáig tartott (bordó rész),

a véglegest 209950-re módosítottam. (piros téglalap)

A LiDAR adatok csak $X_{EOV}=210000$ -ig álltak a rendelkezésemre. (lila vonal)

5.2 Adatgyűjtés

A mintaterületről öt különböző technológiával készült felmérés adatait gyűjtöttem össze és készítettem belőlük domborzatmodelleket. Ezeknek az ismertetését közlöm az alábbiakban a mérési folyamattól a koordinátaállomány létrejöttéig.

A saját mérések számítási jegyzőkönyvei rendre a megfelelő mappákban találhatók.

A saját mérések (GNSS-, barometrikus) esetén a rögzítési időközt 3 másodpercenkéntre állítottam. Ennek oka, hogy az átlagosan 5km/h sebességű bejárás során így *egyrészt* 5 méterenként legalább egy pont rögzül, ami a 10-15 méteres sortávolságok esetén még többletinformációt jelenthet sor-irányban (az azonos soron belüli – sorok közti távolságbeállításhoz képest), de ami még nem feleslegesen sok. *Másrészt* eléggé sűrű ahhoz, hogy az útközben található mikrodomborzati tereptárgyakat lassabb bejárással, gyorsan, kellő részletességgel fel lehessen mérni. V.ö.: 9. ábra

5.2.1 LiDAR adatok

A LiDAR felmérést 2008. május 8-án végezte a TopoSys GmbH két területen (Székesfehérvár belterületén és a Baglyas-Iszka hegycsoport fölött) 5+24 km²-en. A felmérést a Kar kutatásfinanszírozási támogatásból rendelte meg kutatási és oktatási céllal. A mintaterületem fölött a repülési magasság tszf. 1400m volt, a repülést a Telecopter cég végezte. A repülőgép útvonalának kiszámítása kinematikus GPS-méréssel, virtuális referencia felhasználásával történt. (Erről részletesebb információk a projektleírásban nincsenek.) Négyzetméterenként néhány pontot tapogatott le a lézer, melyeknél az első és az utolsó visszaverődést regisztrálták, ebből készítették a különböző kimeneteket. A kimeneti állományok 2x2 km-t lefedő csempék, melyek az EOY és X koordinátákhoz rendelt tartalmazzák a magasságokat, a mért helyekből interpoláltan négyzetméterenként egy pontot, mégpedig az EOY egész méteres négyzetrács négyzeteinek középpontjaiban.

A számomra rendelkezésre bocsátott állomány a digitális mellékletben saf590208.asc fájlneven található meg. A fájlnev értelmezése a projektleírásból derül ki, ez alapján az állomány

- digitális felszínmodell,
- a koordinátarendszer I. negyedében helyezkedik el (EOV esetén csak itt lehet),
- az első visszaverődésekből származó magasságokat tartalmazza (tehát épületeket, fákat stb. is; az adatok nem mentek át szűrésen),
- bal alsó sarok X koordinátája 590000, Y koordinátája 208000.

Tehát az állomány méterenkénti felbontásban összesen négymillió pont magasságát tartalmazza. A belső vizsgálat szerint a vízszintes középhiba 50 cm alatti, a magasságok középhibája pedig 15 cm alatti. Ezt azonban mindössze 10 vizsgálati pont adataival dokumentálja a projektleírás. Az állomány – koordinátajegyzékként – közvetlenül beolvasható domborzatmodellező programokba.

5.2.2. GNSS felmérés – utófeldolgozásos kinematikus mérés

A műholdas helymeghatározást alkalmazó felmérést a barometrikus méréssel egyszerre végeztem. Azonban problémák adódtak, úgyhogy a mérést kétszer végeztem el.

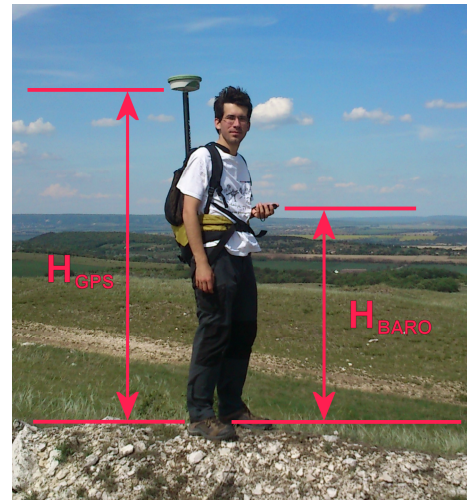
Első alkalommal 2011. október 10-én mértem. Néhány nappal korábban kimentem terepszemlére, megvizsgáltam a terület adottságait, véglegesítettem a határait. Október 10-én az iskolából kölcsönzött Leica GPS 530-as vevővel mentünk ki a terepre ketten. A mérés során két problémával találkoztunk. Először a közeli kőbánya örkutyái kergettek meg, így meg kellett szakítani a mérést, és az úton bemenni a kőbánya biztonsági őrét megkérni, hogy kösse meg őket. Második problémám az volt, hogy amikor a GPS vevő 7 műholdnál kevesebbet észlelt, leállt a rögzítés, és a műholdszám növekedése után sem indult rögtön újra, sőt a végén már egyáltalán nem, így a területnek csak körülbelül egynegyedéről sikerült így adatot gyűjteni. Emiatt volt szükség a második mérésre. A barometrikus mérés ugyanakkor sikeresen lezajlott, ezért ezt a mérési napot részletesebben a következő pontban ismertetem.

A második – ezúttal sikeres – GPS-mérést 2012. május 5-én végeztük. Ezúttal az iskola Leica 1200-as GPS-vevőjét használtam. Ennek kezelőfelülete jobban felhasználóbarát volt, a beállítási lehetőségek is egyértelműbbek voltak, a korábbi probléma ebben az esetben nem jelentkezett.

Busics György tanár úr segítségével már előző nap létrehoztuk a munkaállományt, és elvégeztük a hozzá tartozó konfigurációs beállításokat. Ez alapján csak a 10°-os magassági szög fölötti GPS műholdak jeleit rögzítettem (a GLONASS-t nem), a rögzítést automatikus 3 másodpercenkéntire állítottam be.

A mérés alatt a Gomba-hegy tetején létesített (a „KUTY” pont közelében lévő) kőárokban volt a bázisunk, ide pakoltunk le, itt szereltük össze a műszert, és vártuk meg az inicializálást. Közben elindítottuk a barometrikus felmérést is.

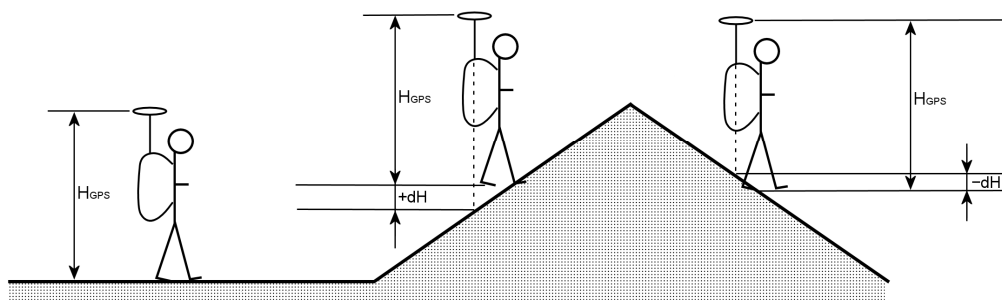
A műszerkonfiguráció a GPS-vevőantennából és a kontrollerből állt, melyek bluetooth-kapcsolatban voltak egymással. A GPS antennát egy 1m-es (fél) antennarúdra helyeztem, ezt a hátizsákomba raktam és erősen hozzárögzítettem, így a rúd végig függőleges helyzetben maradt. A kontrollert a hátizsákom egyik oldalzsebébe helyeztem, mivel a mérés közben nem volt rá szükség, viszont a 3 másodpercenkénti rögzítésekkor rövid csipogás jelezte a tárolást. Ezt hallani lehetett, így folyamatosan tájékozódhattam afelől, hogy nincs



14. ábra

A mérőfelszerelés használata

probléma. A navigációs GPS-t a kezemben tartva mértem a nyomásváltozást, és azon követtem a kijelölt útvonalat is. A műszermagasságot a GPS esetén 1,80 m-re állítottam, a barométernél pedig a feldolgozás során számoltam 4 lábbal, ami közel 1,20 m-nek felel meg. A mérőfelszerelés használatát a 14. ábra mutatja be. Egy lehetséges hibaforrás a meredekebb lejtőkön jelentkezhet: a hátizsákban külpontosan elhelyezett antenna miatt lefelé haladáskor a műszermagasság kisebb, felfelé haladáskor nagyobb. (15. ábra) Ez azonban az elemzések során nem volt egyértelműen elkülöníthető az egyéb zajból, hatása nem jelentős.



15. ábra

A vevőt 10 óra körül kapcsoltuk be, majd az előkészületek után kivonultam a terület délkeleti sarkához. Innen a tényleges mérést 10:51-kor kezdtem. Az útvonalat 10 méteres sorközzel, 3 másodpercenkénti rögzítéssel, 5 – 10 m-es túllógással jártam be. Az utamba eső mikrodomborzatos részeket (tereptárgyak: tankállások, lövészárkok) jellemző vonalaikon (kívül, rajta, belül) nagyjából felmértem. A területet ezúttal csak a 209550 és 209950 EO V koordináták közötti részen jártam be, a 209950 – 210050 közötti 100 m-es sávot csak néhány nagyobb hurokkal fedtem le, hogy legyen róla adat arra az esetre, ha mégis szükség lenne rá. 14:12 és 14:47 között, a 35. sorban, szünetet tartottunk a bázison. Eközben a műszert kikapcsoltam, és kicseréltem az akkumulátorokat. A pihenő után folytatva 16:26-kor fejeztem be a sormérést, 16:26 és 16:38 között a terület északi oldalán (a 209950-es vonalon) mértem egy oda-vissza vonalat, majd a visszatérés előtt még végigjártam a területen lévő utakat is. Ez azért is volt fontos, mert az utak jelentősen belevágódtak a terepbe, emiatt itt-ott kb. 1m-rel vannak alacsonyabban a környező terepszinthez képest. Ezután visszatértem a bázisra, ahol egy 1 percig tartó mérést végeztem a helyszínen V.E. feliratú, a topográfiai mérőgyakorlaton „KUTY” névvel jelzett ponton 16:55-kor. Az automata rögzítést 16:57-kor állítottam le. Ezután az antennát kivettem a hátizsákból, és még egy különálló pontot mértem a KUTY ponton az 1 méteres rudat függőlegesen a pontra illesztve.

Összesen kb. 28 km-nyi utat jártam be, és kb. 6600 hasznos pontot rögzítettem. Fontos tapasztalat, hogy a sorokban az irányt tartani segítség nélkül (szinte) lehetetlen. Segítségként számomra a kézi GPS-be feltöltött útvonalterv volt, valamint a területről észak felé jól látható Csóka-hegy, mely majdnem pontosan a hálózati észak irányába esik. Ezért a délről észak felé haladó sorokban szinte végig elég volt csak (mérő)toronyiránt menni. Az ellenkező irányban nagyobb szerep jutott már a GPS készülékemnek, többször jelentősen eltértem az iránytól (5-10 métert), ekkor korrigálnom kellett. Az utamba eső mikrodomborzati tereptárgyakat is a sormérésből kilépve mértem fel. A bejárt útvonalat – mérési vázlat gyanánt – a VI. melléklet ábrázolja. Tapasztalatom szerint 10 méternél kisebb sorközt választani ekkora területen már nem praktikus.

Feldolgozás – A feldolgozást a Kar számítógépein rendelkezésre álló Leica Geo Office (LGO) szoftver segítségével végeztem. Először azonban virtuális referencia adatokat kellett igényelnem, hiszen az utófeldolgozós kinematikus mérés során referenciaadatokat nem mérünk. A Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI) GNSS Szolgáltató Központjának www.gnssnet.hu weboldaláról, tanulmányi célú ideiglenes

regisztrációt követően töltöttem le a RINEX⁶ formátumú virtuális referenciapont adatait az

északi szélesség: 47° 14' keleti hosszúság: 18° 15' magasság: 250m

koordinátájú pontra vonatkoztatva, 2012. május 5. 10:00 és 17:30 közötti időszakra GPS+2h (helyi idő) szerint, 3 másodpercenkénti sűrűséggel.

Az LGO-ba beolvastam a műszerből kiolvasott, mért pontok és a virtuális referencia adatait, ezekből EOVS koordinátákat számoltam. A mérés során egy rövid szakaszon (15:50 körül) az észlelhető műholdak változásai miatt nem lehetett feloldani a ciklustöbbsértelműséget, ezért a számításba bevont műholdak közül azon az intervallumon kivettem az éppen felkelőket/lenyugvókat, és így már – egy kivételével – sikerült a számítás az összes pontra. A kiértékelés dokumentációját pdf fájlban összegyűjtött képernyőképek formájában a digitális melléklet tartalmazza.

Az LGO-ból koordinátajegyzékként exportáltam az eredményeket, majd ezeket Excelbe olvastam.

5.2.2.1 Származtatott GPS-mérések

A GPS-es mérést, a lehetőségekhez mérten, meglehetősen nagy részletességgel végeztem el. (10 m-es sorok közti, ~4 m-es soron belüli ponttávolság) Kíváncsi voltam, mennyivel lett volna pontatlanabb a modell, ha ritkább sorközöket és rögzítési időközt választok, ezért az eredeti GPS-es mérésből készítettem két származtatott mérést.

Az Excel táblázatban szétválogattam a sorokat, és az összes pontnak adtam egy paritás-értéket is. Ezek alapján készítettem két szelekciót.

- Egyikben minden második sor minden második pontja szerepel. Ez lett a „**GPS-2**” rövidítésű származtatott mérés.

- Másikban minden negyedik sor minden negyedik pontja szerepel. Erre a származtatott mérésre pedig a „**GPS-4**” rövidítéssel hivatkozom a későbbiekben.

A pontok szétválogatásáról készült pontvázlatot a VIII. melléklet tartalmazza.

Burkolópontként mindegyik tartalmazza azonban az első és az utolsó (51.) sor megfelelő paritású pontjait, valamint minden megtartott sor elején és végén a legelső, területen kívül eső pontot.

⁶ Receiver Independent Exchange Format – vevőfüggetlen adatsere-formátum

5.2.3. Barometrikus felmérés

Mint fentebb említettem már, a barometrikus felmérést a GPS-es felméréssel együtt hajtottam végre, mindkét alkalommal. A két mérés közül azonban a 2011. október 10-ei sikerült jobban, mivel akkor kevésbé volt szeles az idő. (Erről bővebben lentebb.) Ezért az összehasonlítások során azt használtam, és a következőkben is azt mutatom be részletesen. A két mérést azonos technológiai paraméterekkel végeztem, különbség a vizsgálati terület méretének már többször említett csökkentésében, és abban volt, hogy októberben 15 méteres, májusban 10 méteres sorközzel mértem.

A tényleges mérést – a műszerproblémák és a kutyák miatt – jelentős csúszással, 12:00-kor kezdtem el (a bázisvevő telepítése már 10:37-kor megtörtént, és a roverrel is mértem egy sort 11:04-től, de ekkor jelentkeztek az említett problémák). 14:53 és 15:32 között szünetet tartottam, a méréssel 17:01-kor végeztem. A mérés során a 4.3.2-es pontban leírtakat alkalmaztam. A bejárt útvonalat a VII. melléklet ábrázolja.

A mérés után (másnap este 19:56 és 00:30 között) egy kontrollmérést végeztem a 4.2-es pontban leírt 1. számú kísérlet szerinti módon, hogy ellenőrizsem a két barométer helyes működését. A mérés igazolta, hogy a műszerek az elvártan megfelelően működnek, a két mérés közti különbség mozgóátlaga 3 lábon belüli intervallumban mozgott, ezen belül is csak akkor tért ki jobban, mikor stressz-teszt céljából a gombok és a ház nyomogatásával igénybevételek tettem ki.

Feldolgozás – A feldolgozás során először a GPS készülékek adatait olvastam ki a MapSource programmal. A program ezeket nyomvonalként (*tracklog*ként) meg is jeleníti, és egyes pontokat vagy szakaszokat törölhetünk is benne (pl. egy helyben álláskor). A program beállításaiiban is át kell állítani a magasságok megjelenítését *lábra*, valamint a koordinátakijelzést „*EOV magyar térképhálózat*”-ra. Ez egy közelítő átszámítást végez a WGS84 ellipszoidi földrajzi koordináták és az EOV rendszer között, amely nem geodéziai, de méteren belüli pontosságú. Ez azonban a navigációs pontosságú felméréshez jól megfelel. A rover és a bázis tracklogját szöveges formátumban exportáltam, onnan az Excelbe töltöttem. A megfelelő formázások után a két mérést összefésültem az idő alapján. A 4.3.2 pontban szereplő 12. ábra képlete szerint számítottam a magasságokat (végül méterre átváltva), a koordinátákat pedig a pilot projektben említett „tehetetlenségi hibát” kiküszöbölendő, a koordinátákat (a megelőző ponthoz viszonyított irányba és sebességgel) 1 másodpercrek megfelelő távval

elcsúsztatam. (Több csúsztatási értéket is kipróbáltam, de a továbbiakban végig a -1-es verzióval dolgoztam.)

Ez a hibajelenség mindkét mérés során megjelent, okait részletesebben kellene vizsgálni, mivel valószínűleg más hatások (például a szél áramlási irányával szemben, vagy megegyező irányban történő haladás közti különbség) is befolyásolhatják a mérést.

5.2.4. Topográfiai felmérés

A topográfiai felmérés adatait az intézeti *Topográfia terepgyakorlat* során felmért pontok alkotják. Sajnos abban az évben, mikor én teljesítettem ezt a tantárgyat (2007.), a szokatlanul zord időjárás miatt nem sikerült használható mennyiségű pontot megmérnünk, ezért átvett adatokat használtam. Az adatokat digitalizált pontoleáta és az abból kiértékelt koordinátajegyzék formájában Balázsik Valéria tanárnőtől kaptam meg.

A Topográfiai terepgyakorlatot minden tanév szeptemberének első hetében szervezi meg a Fotogrammetria és Távérzékelés Tanszék. A helyszíne a Gomba-hegy környékének 1-2 km²-es övezete. A hallgatók négyfős csoportokban dolgoznak. A gyakorlat célja egy 1:5000-es méretarányú topográfiai térkép elkészítése. A domborzatrajzot terepi grafikus felméréssel, a síkrajzi tartalmat ortofotó minősítésével kell létrehozni. A felmérés során a vízszintes iránymérést mérőasztal-felszereléssel és távcsöves vonalzóval végzik a hallgatók, a távmérést pedig mérőállomás segítségével, mely a zenitszögből mérőprogram alkalmazásával egyből számítja a magasságkülönbséget és a vízszintes távolságot. Ezen értékek alapján közvetlenül a terepen kerülnek felszerkesztésre a pontok. Kiindulási adatként kb 15 alappont koordinátái állnak rendelkezésre. Ezeken az alappontokon felállva történik a mérés, egy alappont környékének részletes felmérése után egy másik csapattal cserélnek. A mérőasztalt központosan, a mérőállomást külpontosan, de a lehető legközelebb, 1-2 m-re állítják fel. Ez a távolság a térkép méretarányában maximum 0,2 – 0,4 mm torzulást okoz, ami a domborzatrajzra nézve elhanyagolható. A pontraállás után megtörténik a mérőasztal tájékozása két ismert pontra. A részletpontokra a csoport egy tagja prizmabottal áll rá az előre megbeszélt sorrendben. Ez a csoportokra van bízva, de többnyire idomvonalak mentén, a terep jellegzetességeit követve haladnak. A prizma magasságát a műszermagassággal azonos értékre állítják be, így az alappont magasságából és a mért magasságkülönbségből közvetlenül számítható a részletpont magassága. Ezt méterben, egy tizedes élességgel tüntetik fel a térképlapon; a tizedespont a leszúrt ponthely. Hibahatár az alapszintköz harmada.

Feldolgozás – A kapott koordinátajegyzékből leválogattam a mintaterületbe eső pontokat, és ezekhez még hozzávettem a határvonal szomszédságába eső legközelebbi pontokat úgy, hogy a pontfelhő konvex burka lefedje a mintaterületet. Az 1342-es számú pontot kivettem a listából, mivel láthatóan durva hibával terhelt magasságadata volt.

A felhasznált pontokról készült pontvázlat ábrája a IX. mellékletben szerepel.

5.2.5. SRTM adatok

Az SRTM adatokhoz a <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> internetes oldalon bárki ingyenesen hozzáférhet. Itt egész fokenkénti bontásban található meg a teljes Föld domborzatmodellje, 3x3"-es szögfelbontásban. Ez azt jelenti, hogy minden 3-mal osztható másodperc értékű földrajzi szélesség hosszúság metszéspontjára vonatkozóan található egy magasságadat. Ez egy állományban 1201x1201 értéket jelent. (Az első és az utolsó sor és oszlop az egész fokok sorai és oszlopai.) Én a N47E018.hgt állományt használtam fel. Ez tehát az északi szélesség 47-00-00 fokától a 48-00-00 fokáig, a keleti hosszúság 18-00-00 fokától a 19-00-00 fokáig terjed. Az állományban binárisan, két bájtban, egész méterben találhatók az értékek. Ezt egy általam korábban írt BASIC programmal alakítottam át szöveges állománnyá, melyből a mintaterületemet átfedő részt, az N47-13-36; E18-15-39 és N47-13-54; E18-16-06 közötti szegmenst használtam fel. A földrajzi (vízszintes) koordinátákat a FÖMI GNSSnet weboldaláról ingyenesen elérhető EHT² programmal (<http://gnssnet.hu/letolt3.php>) alakítottam át EOVS koordinátákká. Az átalakítást csak a 4 sarokpontra végeztem el, a többit interpoláltam, mivel ekkora területen a meridiánkonvergencia hatása a modell pontosságához képest elhanyagolható. Az interpoláció számítása Excel táblázatban dokumentálva megtalálható a digitális mellékletben. A koordinátákat tized méter élességgel számítottam, ami bőven elég, hiszen a modellpontok amúgy is nagyjából 63 x 93 m-es rácsot alkotnak, és a magassági adatok élessége is csak 1 méteres, valamint az EHT² program a transzformációt az ETRS89 ellipszoid és az EOVS rendszer között végzi, míg az SRTM-adatok a WGS84 ellipszoidra vonatkozóan lettek számítva. A két ellipszoid rendszere közötti vízszintes eltérés 0,6m körüli [Tarsoly Péter nyomán].

Globális pontszámozás

A feldolgozások eredményeként létrejövő koordinátajegyzékeket összefoglaltam egy egyesített koordinátajegyzékbe (egyesített KJ.xls), melyben minden pontnak egyedi pontszámot: „ID”-t (azonosítót) adtam. Ebben az alábbi tartományokba rendeztem a méréseket:

1000 – 1999:	Topográfiai felmérés pontjai
10 000 – 19 999:	GPS-es felmérés egyenként mért pontjai (pl. KUTY)
20 000 – 29 999:	GPS-es felmérés automatikusan (3 mp-enként) mért pontjai
40 000 – 49 999:	Első (októberi) barometrikus felmérés pontjai
50 000 – 59 999:	Második (májusi) barometrikus felmérés pontjai
70 000 – 79 999:	SRTM pontok

5.3 A koordinátajegyzéktől a domborzatmodellig

A minőségvizsgálat céljára a Golden Software Surfer 10 programjának demó verzióját használtam. Ez mindenre képes, amire a kereskedelmi változat, kivéve a rajzösszeállítások elmentésére. El tudja viszont menteni a létrehozott domborzatmodelleket gridfájlként. Így bonyolult ábrarendszerek létrehozására nem alkalmas, de a szakdolgozatomhoz szükséges elemzések elvégzésére megfelelőnek bizonyult.

A szoftver pontonként sorokba rendezett koordinátalistából X,Y,Z koordinátákat olvas be. Ezután

- az ezek által lefedett területre, vagy annak egy részterületére
- a kiválasztott interpolációs módszerrel
- a meghatározott rácssűrűséggel

grid háló típusú magasságmodellt hoz létre.

A domborzatmodell minősége szempontjából a megfelelő interpolációs módszer és rácssűrűség kiválasztása is van olyan fontos, mint a felmérés technológiájának, paramétereinek célnak megfelelő megválasztása:

- A felmérés átlagos ponttávolságánál sokkal sűrűbb rácsméret felesleges, kivéve, ha az interpolációs módszerrel nagyon jó.
- Valamivel sűrűbb, vagy közel azonos rácsméretet alkalmazva a felmérést nagyon jól közelítő, illeszkedő modellt kapunk.
- Ritkább rácsmérettel elfedhetők az esetleges mérési zajok, ugyanakkor a mikrodomborzati tartalom degradálódik.
- Jóval ritkább rácsmérettel – ha ez a célunk – a mikrodomborzat teljesen eltüntethető.

Az interpolációs módszer jó megválasztásának az átlagos ponttávolságnál sűrűbb rácshálók esetén van jelentősége, hiszen ekkor relatíve kevesebb adatból próbálunk az adatpontok közötti ismeretlen területre értékeket számítani, mint ellenkező esetben, mikor egy rácspont körzetében több mért pont is van.

A „*Sima felület vagy pontos felület?*” dilemmája az egyik legfontosabb kérdés, amire a domborzatmodellek előállítása során választ kell adnunk az aktuális célnak megfelelően.

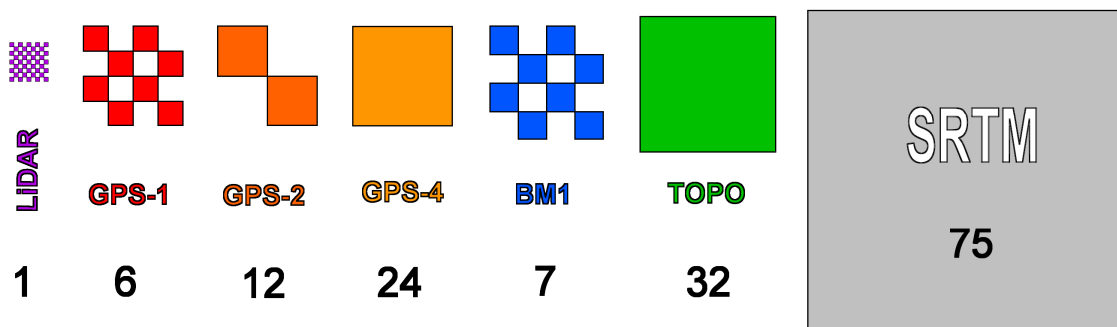
A dolgozatomban öt technológia nyolcféle mérési eredményét használok fel. A második barometrikus felméréssel (BM2) kevésbé jó minősége miatt csak érintőlegesen foglalkozom.

A mérési eredményeket az alábbiakban foglalom össze:

Technológia megnevezése	Pontok száma	Átlagos ponttáv	Forrás	Színkód
LiDAR	200 000	1 m	tanszék	lila
GPS 1	6 000	6 m	saját mérés	piros
GPS 2	1 500	12 m	származtatott	narancs
GPS 4	450	24 m	származtatott	sárgásnarancs
Barometrikus 1 (BM1)	4 600	6,5 m	saját mérés	kék
Barometrikus 2 (BM2)	6 000	6 m	saját mérés	világoskék
Topográfiai (TOPO)	200	32 m	terepgyakorlat	zöld
SRTM	70	75 m	usgs.gov	szürke

1. táblázat

Az átlagos ponttávolságot az alábbi ábra szemlélteti:



16. ábra

A következő fejezetben tárgyalt összehasonlító vizsgálatom célja elsősorban a mérési módszerek, másodsorban a grid előállításakor tett beállítások minőségre vonatkozó hatásának tesztelése. Bár szakdolgozatom célja a mérési módszerek pontossági vizsgálata, ezeket csak akkor lehet függetlenül vizsgálni, ha megismerjük és leszűrjük

azokat a hatásokat, melyeket a grid rácsmérete és az interpoláció hozzáad a mérési pontosságához.

Ezért az összehasonlításokhoz az

- (1.) összes mérésre ki kellene próbálni az
- (2.) összes (célnak megfelelő) interpolációs eljárást és
- (3.) egy többtagú rácsméret-sorozatot (kvázi-logaritmikus skálán).

Ez egy háromdimenziós tömböt eredményez, melynek – az elemzések során kialakult tapasztalataimnak megfelelően – csak kiválasztott részeit vizsgálom:

- (1.) Elsődleges célom a mérési módszerek tesztelése, tehát a BM2-es módszer kivételével mind a hét módszerre elkészítettem a
- (2.) *krigelt* interpolációval készülő grideket
- (3.) 1, 2, 5, 10, 20, 50 méteres rácsmérettel, valamint
- (2.) *natural neighbour* és *TIN* interpolációval készülő grideket
- (3.) 2 és 10 méteres rácsmérettel.

A mérési módszerenként elkészült grid állományokat a megfelelő méréseket tartalmazó mappák *grid* almappái tartalmazzák.

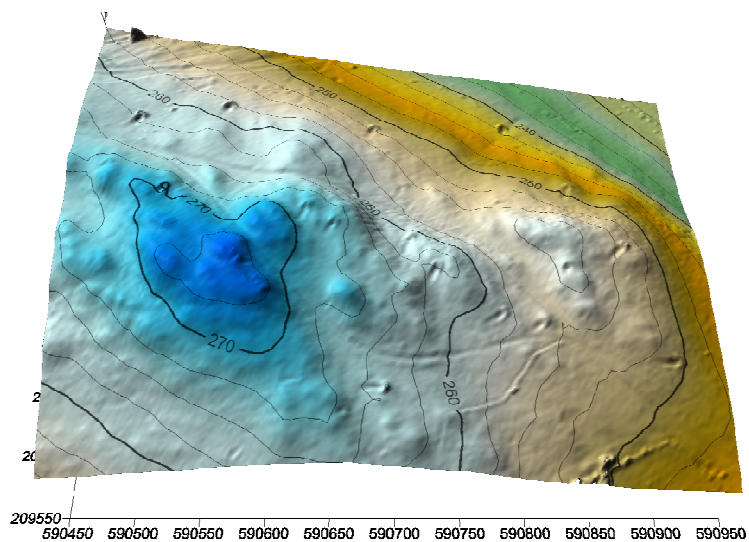
Megjelenítés

Informatikai értelemben tehát elkészültek a domborzatmodellek. Szükség van azonban a megjelenítésre, a céloknak megfelelő ábrázolásra a vizuális összehasonlíthatósághoz. Az eredmények szemléltetése szükséges ahhoz, hogy munkánk eredményességéről meggyőződhesünk.

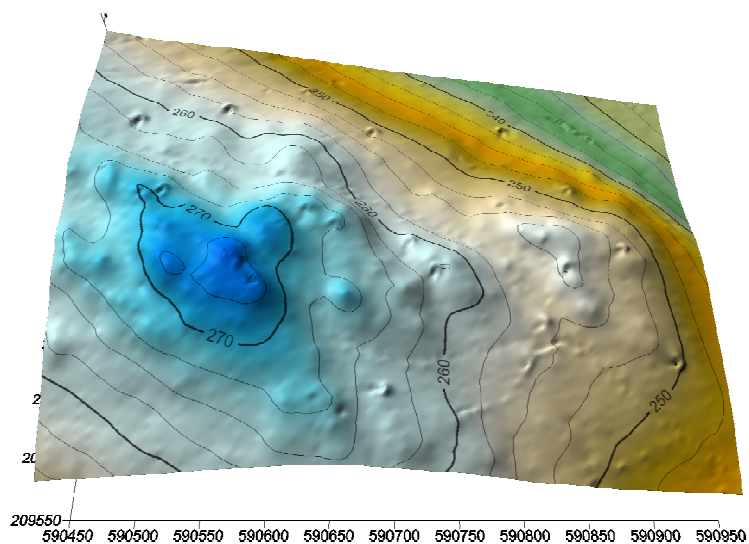
A különféle felmérési módszerek eredményét az alábbiakban

(1) *szintvonalas, perspektivikus, árnyékolt, színátmenetes rétegszínezéses ábrákkal*, valamint (2) az utánuk következő *szintvonalas összefoglaló ábrával* (18. ábra) kívánom szemléltetni. A teljes *technológia–rácsméret mátrixot* (3) a X. melléklet tartalmazza. A III. és a digitális mellékletben (4) *anaglif térhatású ábrák* mutatják be még érzékletesebben a felszínt és domborzatát. Ezeket a Surfer programban perspektivikusan megjelenített domborzatmodellek 2-3 fokos forgatásával, a bal és jobb kép türkiz- és pirosárnyalatosra színezésével és a megfelelő helyen történő egymásra illesztésével készítettem el. A szemléléshez szükséges színszűrős szemüveg mellékelve megtalálható.

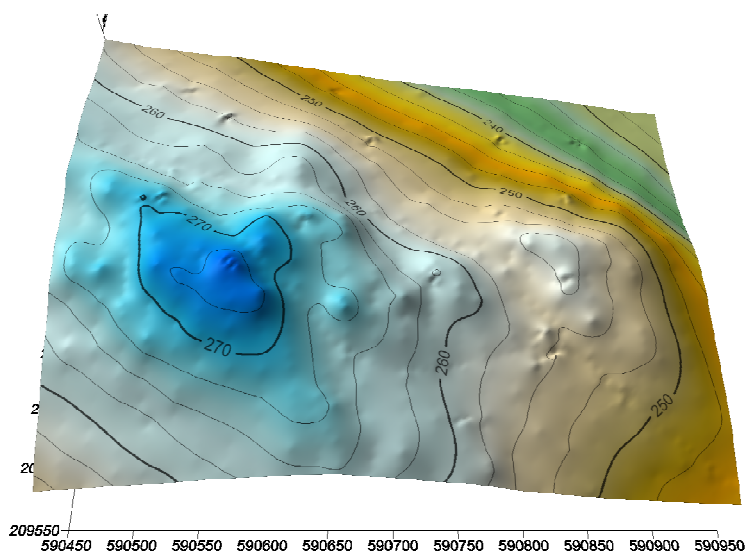
A következő ábrák grid hálói krigeléses interpolációval, 2m-es rácsközzel készültek.
Alapszintköz: 2,5m; K-Ny irányú méretarány közelítőleg 1:7000.



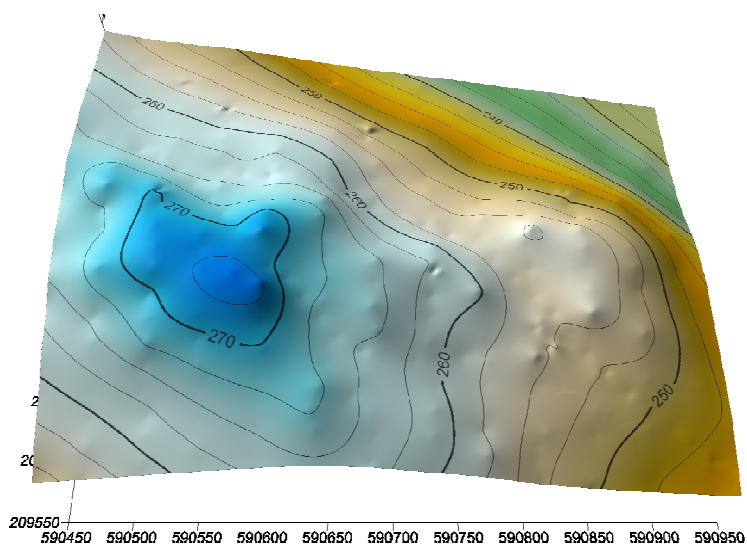
17/a ábra: LiDAR felmérés



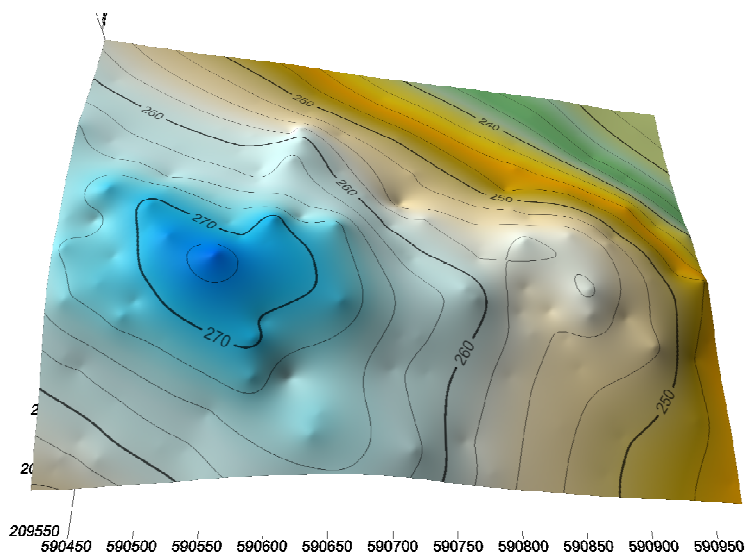
17/b ábra: GPS 1
(„eredeti” GPS-es felmérés)



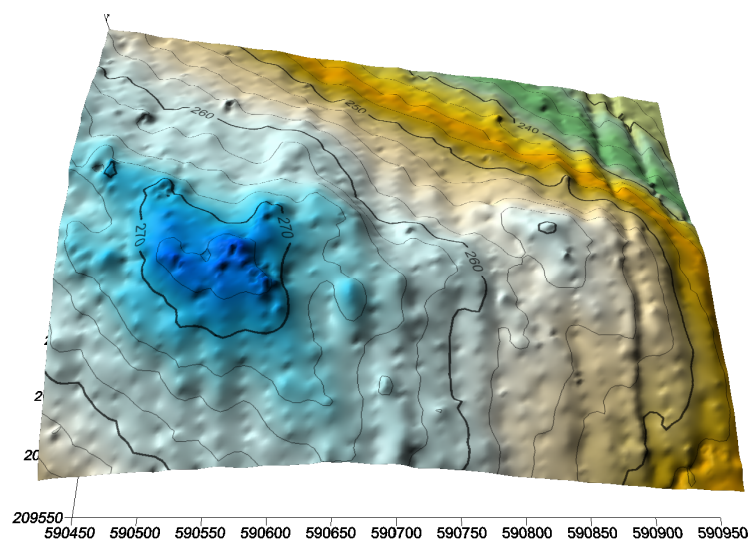
17/c ábra: GPS 2



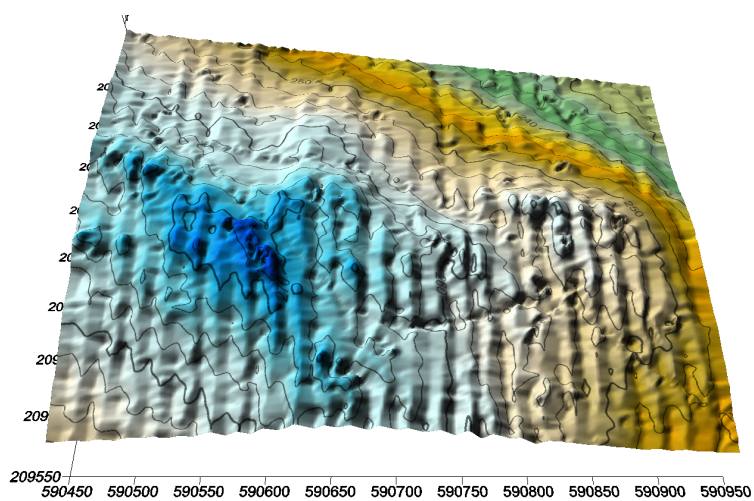
17/d ábra: GPS 4



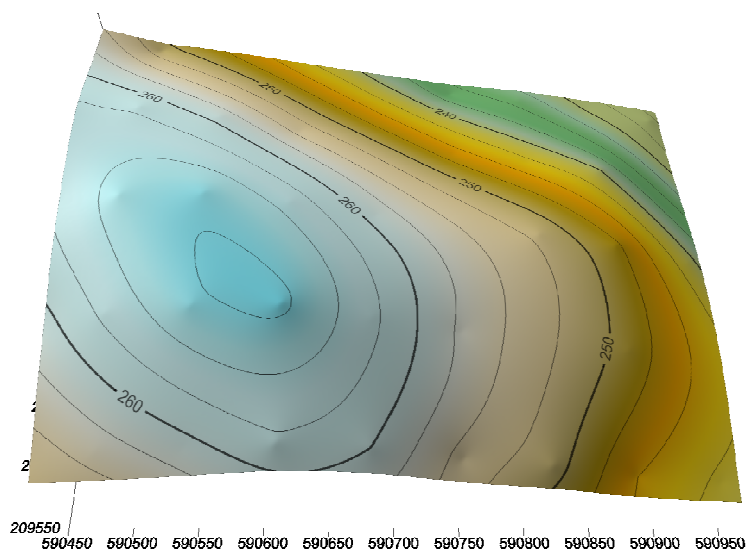
17/e ábra: Topográfiai felmérés



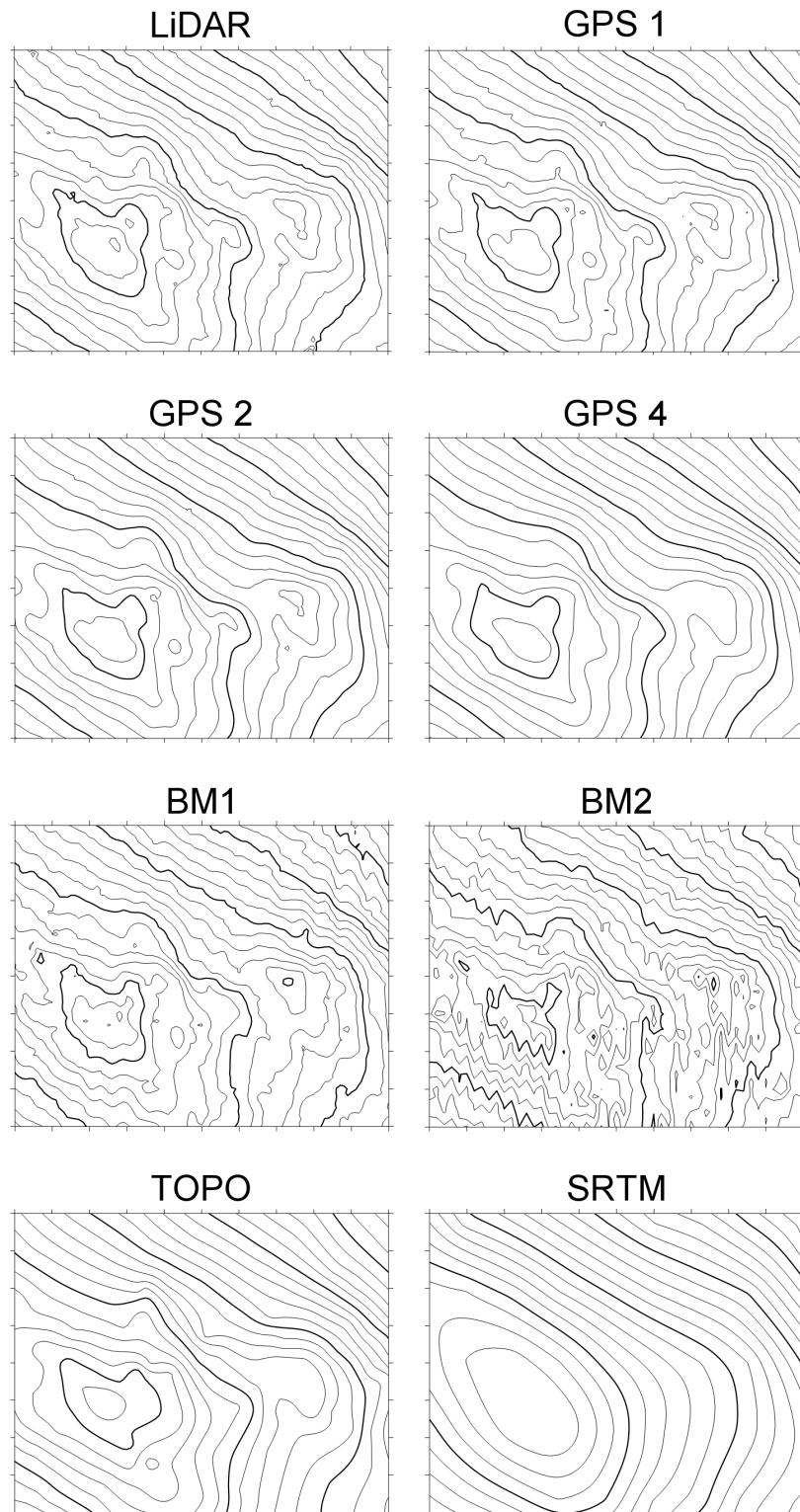
17/f ábra: Barometrikus felmérés, október (BM1)



17/g ábra: Barometrikus felmérés, május (BM2)



17/h ábra: SRTM domborzatmodell



18. ábra

A domborzatmodellekből készített szintvonalrajzok összehasonlítása

$M = 1:10\,000$

5m-es krigelt rácshálóból; alapszintköz: 2m

6. Kiértékelés és vizsgálat

6.1 Általános tapasztalatok

A Surfer által felkínált interpolációs lehetőségek közül tehát a

- Kriging
- Natural neighbor
- Triangulation with Linear Interpolation

módszereket vontam be a tesztelésbe. Ezek közül a krigelést választottam referenciamódszernek, a mérési módszerek és rácsméretek összehasonlításának keresztmetszetét ezzel készítettem el.⁷

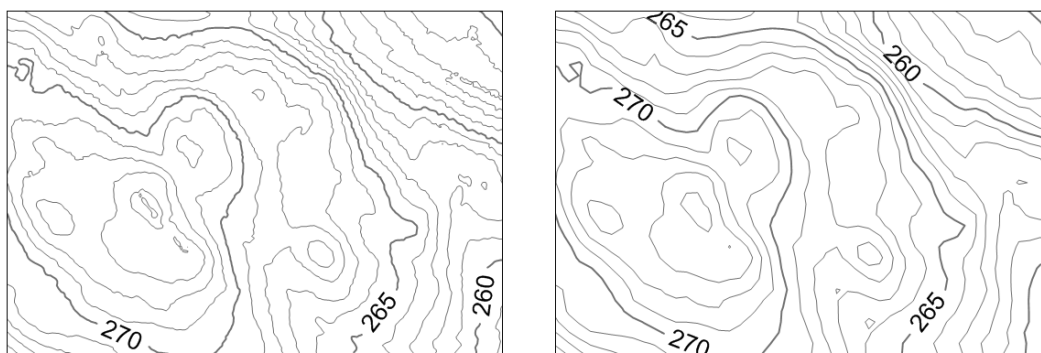
A rácsméretek megválasztásánál a várható igények alapján két kimenet teljes körű összehasonlítását végeztem el, ezek a 2m-es és 10m-es grid állományok.

A 2m-es gridben a LiDAR mérésben tapasztalható zaj kiegyenlítődik, viszont még elég részletes ahhoz, hogy a mikrodomborzati elemeket megfelelő részletességgel tartalmazza, azok felismerhetők és szemléletesek legyenek rajta.

A 10m-es gridben a mikrodomborzati objektumok már „belesimulnak” a terepbe, így azokban az alkalmazásokban, ahol nincs rájuk szükség (pl. térképek szintvonalrajzának elkészítéséhez, ahol csak a makrodomborzatot ábrázolják) nem terhelik feleslegesen a térképi tartalmat.

Az 1m-es és 5m-es rácsméretekből levezetett szintvonalrajzok közti különbséget a 19. ábra szemlélteti egy részterületen:

M=1:4000



19. ábra

⁷ Az interpolációk háttérének vizsgálatával Farkas Gábor foglalkozott részletesebben szakdolgozatában. [8]

Tapasztalataim szerint az esztétikus szintvonalas ábrázoláshoz a térképen 1mm-nek megfelelő felbontású grid rács szükséges. Ez azt jelenti, hogy például egy 1:10000-es méretarányú térkép esetén 10m-es rácshálót célszerű alkalmazni. A fenti ábra 1:4000-es méretarányához láthatóan esztétikusabb eredményt adott az 5m-es felbontás, ugyanakkor a szintvonalak rajzolata még nem töredezett és jellegtelen.

6.2 Összehasonlítás és pontossági vizsgálat

Az összehasonlításoknak területi alapon három típusát különböztetem meg:

A **globális összehasonlítás** során a teljes mintaterület az elemzés tárgyát képezi. Ez egy átfogó képet ad a terület egészére, tekintet nélkül annak belső jellegváltozásaira. Én részletes statisztikai vizsgálataimat így végeztem.

A **lokális összehasonlítás** esetén választott részterületenként, különféle domborzatú, növényzetű stb. területekből vett mintákra végzünk összehasonlításokat, hiszen bár a globális statisztika összetett és részletes képet ad, mégis elképzelhető, hogy a részletekben eltérően viselkednek a különféle technológiák. (Például lehet, hogy a teljes területen a középhiba alacsony, de helyenként jelentős eltéréseket okoz a mikrodomborzat.) Ezt az összehasonlítás-típust dolgozatomban csak érintőlegesen, a különbségmodellek képi megjelenítésével mutatom be. Esetleg egy későbbi kutatás alapját képezheti.

A **pontonkénti összehasonlítás** néhány vizsgálati pontban veti össze a mérési eredmények közti különbségeket. Ilyen összehasonlítást alkalmaztak a LiDAR felmérés minőségvizsgálatánál. Én a topográfiai felmérés során KUTY névvel jelölt és „V.E.” feliratú kövel állandósított alappontra végeztem el a vizsgálatot, melyet az alábbiakban be is mutatok.

A barometrikus felmérés abszolút magassághoz illesztését ebben a pontban hajtottam végre, ezért ebben a pontban a rajtam lévő hátizsákban elhelyezett antennával (1,80 m-es műszermagassággal) és az 1m-es rudat az alappontra helyezve (1,00 m-es műszermagassággal) egyaránt végeztem mérést. A LiDAR mérésből és a topográfiai felmérésből pedig kiválasztottam a legközelebb eső pontokat. (Később végülis a magasságokat a LiDAR átlagához illesztettem, de erről majd a továbbiakban szólok részletesen.)

A V.E. feliratú pont magasságai:

GPS-ből hátizsákban lévő antennával:	273.55	05/05/2012 16:54:42 – 16:55:51
GPS-ből a ponton: 590588.39 209681.22	273.45	05/05/2012 16:59:51 ID=10015
LiDARból: 590588.50 209681.50	273.83	
Topográfiaiból: 590575.0 209701.1	273.8	ID=1178

Mint látható, a két legpontosabbnak tartott mérés: a LiDARos és a biztosan ismert műszermagasságú GPS-es között 38 cm különbség van. Mint a későbbiekben látni fogjuk, ez a különbség jellemzőnek mutatkozik a teljes területen.

6.2.1 A különbségmodellek

A vizsgálatom törzsét a globális összehasonlítások teszik ki. Az összehasonlítás különbségmodellek létrehozását jelentette. A különbségmodell nem más, mint két, egymással megegyező területet megegyező rácsmérettel lefedő grid modell egymásnak megfelelő pontjaiban vett értékeinek különbségéből készített, az eredeti modelleknek megfelelő területű és rácsméretű grid modell. Valamennyi összehasonlításnál irányelv volt, hogy a vizsgálat tárgyát képező modell töltötte be a kisebbitendő szerepét, az összehasonlítás referenciáját képező modell pedig a kivonandó szerepét. A referenciamodellek interpolációvizsgálat esetén a krigeléses, technológiavizsgálat esetén a LiDARos modellek.

A vizsgálat során az alábbi modelleket készítettem el:

A technológiát vizsgáló (krigelt LiDARhoz viszonyított) különbségmodellek:

► **Krigeléses interpolációval** [D-jelű gridek]

- 1, 2, 5, 10, 20, 50 méteres rácsméretekkel:

GPS 1 – LiDAR

GPS 2 – LiDAR

GPS 4 – LiDAR

TOPO – LiDAR

BM1 – LiDAR

SRTM – LiDAR

- Csak 2 és 10 méteres rácsméretekkel:

BM2 – LiDAR

► **Natural Neighbor és TIN interpolációval** [M-jelű gridek]

- 2 és 10 méteres rácsméretekkel:

GPS 1 – LiDAR

TOPO – LiDAR

BM1 – LiDAR

Az interpolációtípus hatását vizsgáló (Krigeléshez viszonyított) különbségmodellek:

[S jelű gridek]

► **GPS 1 mérésre**

- 2 és 10 méteres rácsméretekkel:

Natural Neighbor – Kriging

TIN – Kriging

► **Topográfiai mérésre**

- 2 és 10 méteres rácsméretekkel:

Natural Neighbor – Kriging

TIN – Kriging

► **Barometrikus (BM1) mérésre**

- 2 és 10 méteres rácsméretekkel:

Natural Neighbor – Kriging

TIN – Kriging

Ezeket elegendőnek éreztem ahhoz, hogy a statisztikákban lévő trendek megfigyelhetőek legyenek.

Az így létrehozott különbségmodellek a Surfer programban *megjeleníthetőek grafikus*an – ugyanazokkal a lehetőségekkel, mint a domborzatmodellek (lévén, hogy teljesen ugyanolyan grid állományok). Ezeken akár megtehető a lokális összehasonlítás is vizuális interpretáció formájában. Azaz, kiválaszthatóak a domborzatnak olyan területei, amelyek érdeklődésre tarthatnak számot – jelen esetben például a tankállások és lövészárkok környéke, vagy a kisebb domborzati egyenetlenségek, és vizsgálható, hogy mely módszernél mennyire jelennek meg a különbségmodellen. A grafikus összehasonlítás ábrák formájában a XI.a és XI.b mellékletekben található.

Ezen kívül *értékelhetőek numerikusan* – a program által felajánlott *Grid Info Report* funkcióval, mely egy részletes statisztikai elemzést készít a számított magasságkülönbségre, mint valószínűségi változóra. A Grid Info Report fájlok PDF formátumban megtalálhatók a digitális melléklet Elemzés nevű mappájában. A fájlnev a következőképp épül fel:

"GridInfoReport-" + [csoportjel] + " " + [technológia1] + "_" + [interpoláció1] + [rácsméret] (+ " - " + [technológia2] (+ "_" + [interpoláció2] + [rácsméret])) + ".pdf"

ahol:

csoportjel: A=domborzatmodell; D,M,S=különbségmodell a fenti beosztás szerint

technológia1: a felmérés technológiája a szokásos rövidítéssel

interpoláció1: k=kriging; n=natural neighbor; t=triangulation with linear interpolation

rácsméret: a grid rádspontok távolsága

csak D,M,S jelű különbségmodell esetén:

technológia2: a referenciatechnológia rövidítése (D és M jelű modell esetén „L”)

csak S jelű különbségmodell esetén:

interpoláció2: a referencia interpolációs módszer rövidítése

6.2.2 A tapasztalatok

A létrehozott Grid Info Reportokból kiolvasható fontosabb statisztikai jellemzőket táblázatba foglaltam. Ezek a jellemzők az alábbiak:

Minimum – *minimum*

A minta legkisebb értékű eleme.

Maximum – *maximum*

A minta legnagyobb értékű eleme.

Range – *terjedelem* (=maximum–minimum)

Annak az intervallumnak a tágassága, amely magában foglalja az összes elemet.

Mean – *átlag*

A minta elemeinek számtani közepe.

Median – *medián*

Az elemeket növekvő sorba rendezve a középső elem értéke – az az érték, mely a halmazt elemeinek darabszáma szerint két egyenlő részre osztja.

10% Trim Mean – *10%-os csonkolt átlag*

Az a középérték, amit a mintaelemek legkisebb és legnagyobb 5-5%-ának eltávolítása után kapott halmazból számítunk.

Root Mean Square (RMS) – *négyzetes középérték*

Az elemek négyzeteinek számtani közepének négyzetgyöke.

Variance – *variancia*

Az elemek átlagtól való eltéréseinek négyzetének számtani közepe.

Standard Deviation – *szórás*

A variancia négyzetgyöke.

Interquartile Range – *interkvartilis terjedelem*

Annak az intervallumnak a tágassága, amelybe az elemek nagyságrend szerinti középső 50%-a tartozik.

Average Absolute Deviation – *átlagos abszolút eltérés*

Az elemek átlagtól való eltéréseinek abszolútértékeinek számtani közepe.

Standard Error – *standard hiba*

Variancia osztva a mintaelemszám négyzetgyökével.

Skewness - ferdeség

A minta eloszlását legjobban közelítő Gauss-görbe „asszimmetrikussága”. A ferdeség pozitív, ha a görbe maximuma az alacsonyabb értékek felé tolódik; nulla, ha szimmetrikus; negatív, ha a maximum a magasabb értékek felé tolódik.

Kurtosis – kurtózis, csúcsosság

A minta eloszlását legjobban követő Gauss-görbe csúcsossága. A standard normális eloszlás kurtózisa 1, a kisebb varianciájú görbék csúcsossága nagyobb.

Mean Square – a négyzetek átlaga

Az elemek négyzeteinek számtani közepe. (RMS^2)

Ezeket a statisztikai paramétereket és a belőlük levont következtetéseket összefoglaló táblázat a XII. mellékletben és az elemzés nevű mappában lévő grid infók.xls állományban található.

A fentebb említett statisztikákat két kategóriába sorolom. Egyikbe tartoznak azok, melyeknek az értéke függ az elemek abszolút helyétől, másikba azok, melyek csak az elemek eloszlásától függnnek. Előbbibe tartoznak a minimum, maximum, az átlagok, a medián, a négyzetes közép (RMS) és a négyzetek átlaga. Utóbbiba a szórás, variancia, tágasságok, átlagos abszolút eltérés, standard hiba, ferdeség, kurtózis.

Tapasztaltak az átlagok eltérésével kapcsolatban:

Az elsődlegesen szembeötlő tény, hogy mind a GPS-es, mind a topográfiai felmérés (magasságainak) átlaga mintegy fél méterrel (kb. 48 cm-rel) a LiDAR-felmérés átlaga alatt van. (globális összehasonlítás) Ez már a GPS-es technológia ismert abszolút magassági pontosságát is jóval meghaladja, ugyanakkor a topográfiai felmérés – mint független mérés – is alátámasztja, hogy nem valamilyen durva és/vagy számítási hibáról van szó.

Továbbá, a különbségmodellek ábráját szemlélve (lokális összehasonlítás) megállapíthatjuk, hogy a terület északi és déli felén a különbségek eltérőek. Az északi részen 60-70 cm, a déli részen 25-35 cm körüliek. A terület középső sávján pedig, nagyjából a 209700 – 209780 közötti EOVI koordinátájú tartományban, a mérést a két rész különbségével megegyező amplitúdójú zaj terheli.

A jelenség okára két magyarázatot találtam, melyek valószínűleg együttesen jelentkeznek:

1.) A lézerletapogatást végző repülőgép helymeghatározását hiba terhelte, ez az egyes repülési sávokban más és más értékű volt, a zajos rész pedig a sorok közti átfedési terület, mely a szomszédos sorok mindegyikéből tartalmaz adatokat, ezért hol az egyik, hol a másik sorból származó jel került a készített modellbe.

2.) A felszínmodell a lézerjelek első visszaverődéseiből készült. Ezek a felszínen lévő növényzetről verődnek vissza, nem a talajszintről, amire viszont a többi mérés vonatkozik. A LiDAR felmérést augusztus hónapban végezték, ekkor a területet borító gyepvegetáció jól fejlett, könnyen elképzelhető tehát, hogy hatása néhány deciméterrel megemeli az átlagot. (A területnek csak elhanyagolhatóan kicsi részét borítja ennél magasabb növényzet, ami az átlagot jelentősen növelné.)

Az **alábbi táblázat** a különböző technológiák átlagainak a LiDAR mérés átlagától vett különbségeit mutatják:

technológiák	Átlag	Medián	10% csonk. átlag
GPS1	-0,47	-0,47	-0,47
GPS2	-0,47	-0,47	-0,46
GPS4	-0,51	-0,49	-0,50
TOPO	-0,47	-0,53	-0,49
BM1*	-0,52	-0,56	-0,53
BM2**	-1,05	-0,95	-1,02
SRTM	-3,10	-3,05	-3,08

2. táblázat

* A BM1 mérést a későbbiekben 50 cm-rel eltoltam fölfelé, hogy illeszkedjen a LiDAR modelljére. Ekkor még nem vontam le a következtetést a LiDAR mérés hibájára vonatkozóan, úgyhogy ez a mérés a táblázatokban mindenütt a LiDARhoz igazított magasságokkal szerepel. Ennek azonban, miután vizsgáltuk az átlagok különbségeit, már nincs jelentősége, hiszen a minőségre vonatkozó további statisztikák nem függnak a különbségek abszolút helyétől, csak azok eloszlását vizsgálják egy relatív (az átlaghoz viszonyított) térben. Így a következőkben bemutatott statisztikák értékei a fél méteres eltolástól függetlenek.

** A BM2 értékek jelentősen eltérnek a trendként észlelhető fél méter körüli különbségtől. Ennek oka, hogy a barometrikus mérés egy relatív módszer, annak abszolút

rendszerbe illesztését megfelelő módszerrel kell elvégezni. Egy módszer erre egy másik (jó) mérés átlagához való illesztés, amit próbaként a BM1 módszer esetén elvégeztem.

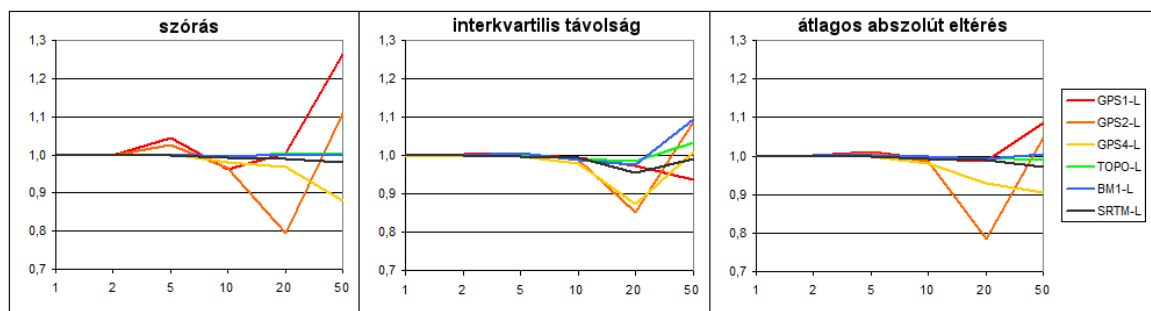
Az imént tehát az átlagok eltérését vizsgáltam. Megállapítottam, hogy az összes mérés – az SRTM kivételével – jól közelíti egymást a LiDAR mérés szintje alatt körülbelül fél méterrel. Az SRTM mérés átlaga pedig körülbelül 3 méterrel található a LiDAR mérés alatt. Ennek oka lehet például mérési hiba, vagy a felhasznált globális geoidmodell helyi pontatlansága.

Tapasztaltak a különbségértékek eloszlásával kapcsolatban:

A továbbiakban a modellek átlaghoz viszonyított szóródásának vizsgálatával foglalkozom. Erre a három legjellemzőbb mérőszámnak a szórást, az interkvartilis távolságot és az átlagos abszolút eltérést találtam. Emellett érdekes lehet még figyelni a kurtózis értékét is.

Az értékek függése a grid rácsméretétől:

A különbségmodellek szórását, interkvartilis távolságát és átlagos abszolút eltérését a rácsméret változásainak függvényében az alábbi ábra szemlélteti. Az ábra által bemutatott modellek mindegyike krigeles interpolációk összehasonlításából származik. Az értéktengelyen az egyes statisztikai jellemzők az 1 méteres rácsméretű modellhez vannak arányítva (annak értékét minden modellre 1-nek véve):



20. ábra

Az ábra alapján látható, hogy az 1-től 10 méteres tartományba eső rácsméretű modelleken a fenti értékek közel állandónak tekinthetők, csupán néhány %-on belül változnak. Ebből azt a következtetést vonom le, hogy a technológiák vizsgálatánál nincs jelentős szerepe a rácsméretnek a pontosságra. Megfelelő lenne például csak a 2 méteres rácsméretű modellt elkészíteni. Mivel én elkészítettem belőlük egy egész sorozatot, abból

az első négy tag (az 1, 2, 5, 10 méterese) jellemzőinek az átlagát használtam a végkövetkeztetések levonásához.

Az értékek függése az interpoláció típusától:

Az interpolációk közti különbséget két módon vizsgáltam:

Egyrészt a Natural Neighbor és a Triangulation with Linear Interpolation típusokkal készült modelleket hasonlítottam össze az azonos technológiával készült krigelt LiDARos modellel. Ezek az előzőekben „M jelű”-ként elnevezett különbségmodellek. Esetükben a fenti nagyságrendbe simuló eltéréseket tapasztaltam, így megállapítható, hogy szintén nincs jelentős hatása más (de alkalmas!) interpolációs eljárásoknak.

Másrészt az azonos technológiával készülő, de különböző interpolációval készített modellek különbségét képeztem. Ezek az előzőekben „S jelű”-ként említett különbségmodellek. Összefoglalóan az alábbiakat tapasztaltam:

technológia	interpolációk	szórás	interkv. táv	átl. absz. elt.
GPS1	nat.nb. - kriging	0,03	0,02	0,02
GPS1	t.l.i. - kriging	0,04	0,03	0,03
TOPO	nat.nb. - kriging	0,18	0,20	0,13
TOPO	t.l.i. - kriging	0,26	0,24	0,18
BM1	nat.nb. - kriging	0,08	0,08	0,06
BM1	t.l.i. - kriging	0,13	0,12	0,09

3. táblázat

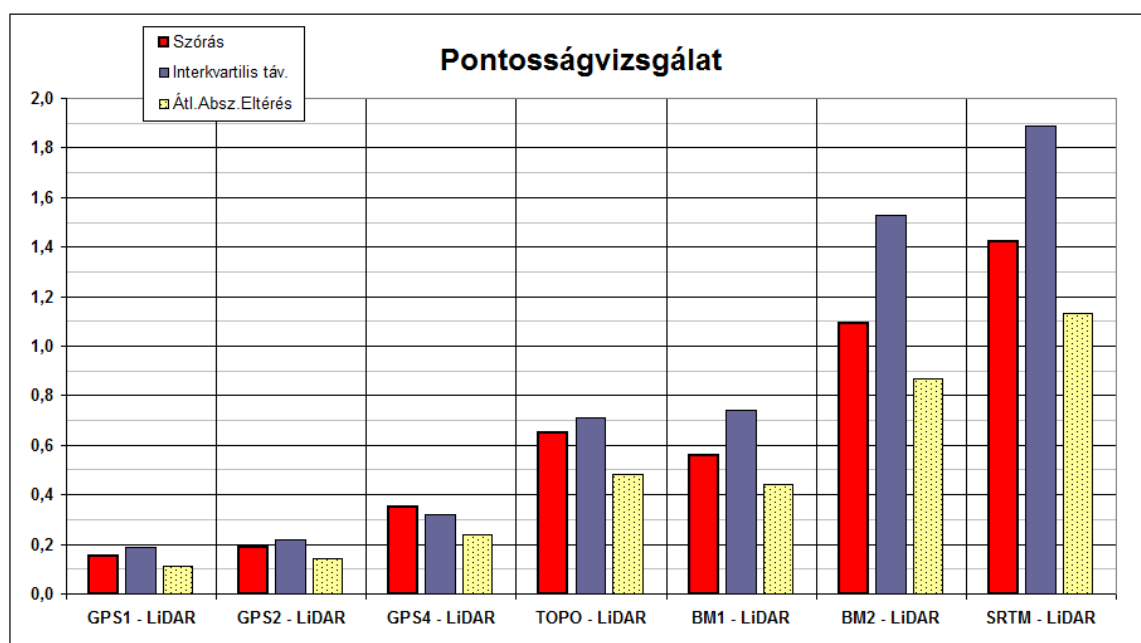
Az értékek függése a technológiától:

Az előbbieken tehát beláttuk, hogy a rácsméretnek és az interpoláció típusának hatása néhány százaléknival befolyásolhatja a pontosságot. A technológiától függő jelentős különbségekhez képest ez gyakorlatilag elhanyagolható. Egy következő kutatás során elég lehet egy interpolációt és egy rácsméretet (pl. a 2m-es kriggeltet) vizsgálni. Az én következő vizsgálatomban azonban az összes módszer 1 és 10 közötti rácsméretű különbségmodelljeiből számított statisztikák átlagai szerepelnek.

Az egyes technológiák pontosságára jellemző értékeket az alábbi táblázat és a hozzá tartozó diagram foglalja össze. Az értékek méterben értendők.

technológiák	Variancia	Szórás	Interkvartilis távolság	Átl.Absz.Eltérés	kurtózis
LiDAR	0,010	0,10	---	0,08	---
GPS1 - LiDAR	0,023	0,15	0,19	0,11	75
GPS2 - LiDAR	0,037	0,19	0,22	0,14	30
GPS4 - LiDAR	0,13	0,35	0,32	0,24	10
TOPO - LiDAR	0,43	0,65	0,71	0,48	4,5
BM1 - LiDAR	0,31	0,56	0,74	0,44	3,2
BM2 - LiDAR	1,20	1,09	1,53	0,87	3,2
SRTM - LiDAR	2,03	1,42	1,89	1,13	2,6

4. táblázat

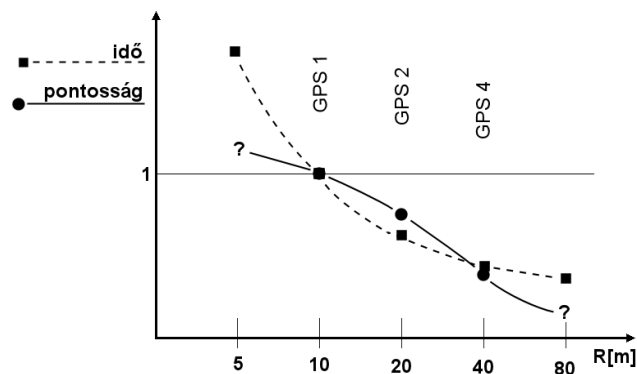


21. ábra

6.3 Értékelés, költséghatékonyság

6.3.1 A GPS1 – GPS2 – GPS4 mérések értékelése

Látható tehát, hogy legjobb eredményt a GPS1-es méréssel értem el. Mivel ennek a mérésnek a felbontása elég jó, érdemes vizsgálni, hogy mennyivel romlana a pontosság, ha fele vagy negyede olyan sűrűen jártam volna be a területet. Ez 20 illetve 40 méteres sorközüket jelentene. E célból készítettem el a GPS2 és GPS4 származtatott méréseket. Azt tapasztaltam, hogy 10 helyett 20 méteres rácsméret alkalmazása esetén a pontosság közel a háromnegyedére, 20 helyett 40 méteres rácsméret esetén nagyjából a felére (tehát a 10 méteresnek kb. 35-40%-ára) esett vissza. A befektetett terepi munka mellett mindkét esetben az előző felére csökkent, a feldolgozás ideje pedig azonos. Emiatt, ha megelégszünk egy csekély mértékkel kisebb pontossággal, választható a 20 méteres sorköz is. A 40 méteres sorköz azonban már jelentős minőségromlással jár, melyet a mérés idejéből származó előny már nem pótol. A trendből és a tapasztaltakból az is sejthető, hogy kisebb (pl. 5 m-es) rácsmérettel csekély mértékben még növelhető a pontosság, de az így kétszeresére növvő mérési időt ez már nem kompenzálja. Vázlatosan szemlélteti ezt a X. ábra, melyen a 10m-es sortávolságú bejárásra vonatkozó munkaidő- és pontosságadatok vannak egységnyiinek véve.



22. ábra

Előnyök: Ez a módszer a vizsgáltak közül a legpontosabb. Közvetlenül abszolút magasságot szolgáltat, számottevőek csak a felmérő személy gyaloglás közbeni szabálytalan mozgásaiból, a rosszul megadott műszermagasságból és az antenna lötyögéséből, elfordulásából származó hibák lehetnek, de ezek is csak szélső pontosságot igénylő felmérések esetén. Feldolgozása viszonylag egyszerű, végén azonnal digitális koordinátaállományhoz jutunk.

Hátrányok: Sűrű sorközök esetén a mérési idő hossza, a felszerelés igen magas ára és a referenciaadatok költsége (utóbbi az én esetemben 14000 Ft körüli összeg lett volna).

6.3.2 A topográfiai felmérés értékelése

A GPS-es mérések pontosságánál jóval kevésbé pontos a topográfiai terepgyakorlaton készített felmérés. Ennek okai lehetnek a ritkább pontsűrűség, a hallgatók gyakorlatlanságából fakadó mérési hibák, a részletpontok nem megfelelő megválasztása, valamint, hogy ennél a technológiánál nem cél a mikrodomborzat szintvonalas felmérése. (A mikrodomborzatot ugyanis inkább tereptárgyként kezelve, jelkulccsal ábrázolják, ahol szükséges.)

Előnyök: Oktatási-didaktikai célra különösen alkalmas, a hallgatók közvetlen kapcsolatba kerülnek a tereppel, hiszen akár már a helyszínen megrajzolhatók a szintvonalak egy-egy álláspont környékén.

Hátrányok: A módszer korszerűtlen, egy pont fajlagos meghatározási és rögzítési ideje egy nagyságrenddel több, mint a GPS-es mérésnél.

6.3.3 A barometrikus felmérés értékelése

Az októberi barometrikus felméréssel – megelégedésemre – sikerült elérni a méter alatti magassági középhibát. A második mérés már nem sikerült ilyen jól. Valószínűleg az erős szél miatt, melynek a légnyomásmérő érzékelőnyílására gyakorolt áramlástan hatásait nem lehetett kiküszöbölni. Mégis, ha belegondolunk, hogy mindezt egy középkelet-európai navigációs GPS-vevővel, ráadásul kinematikus módszerrel (tehát folyamatos mozgás közben, és nem in vitro körülmények között sikerült elérni, én sikerként értékelem. Gondoljuk meg: egyetlen méter magasságváltozás 12 Pascal nyomásváltozást jelent, ami az átlagos tengersizinti nyomás körülbelül 1/10000-ed része.

Előnyök: A módszer olcsó, viszonylag könnyen hozzáférhető és kis eszközigényű, hobbiszintű felhasználásra is alkalmas. A műszer (jóval pontatlanabban bár, de) olyan helyeken is képes GPS-pozíciót rögzíteni, ahol a geodéziai vevő már rég nem, és ahol a topográfiai felmérés is problémássá válik az összelátás miatt. (Pl. erdőben.)

Hátrányok: Sokféle hatástól függ a megbízhatósága, amely többszöri méréssel még talán növelhető lenne. A feldolgozás azonban a megfelelő programok hiányában teljesen ránk van bízva, ráadásul nehezen automatizálható, sok tényezőt kell figyelembe venni, emiatt a feldolgozás időigénye magas.

6.3.4 Az SRTM modell

Az SRTM adatok felhasználása során egy elnagyolt modellhez jutottam – mint ahogy ez várható is volt. Ami újdonságnak számított, hogy az átlagmagassága 3 méterrel alatta volt a referenciamodell átlagmagasságának. Érdeemes lenne az ország több pontján hasonló mintaterületeken vizsgálni, hogy az eltérés itt lokális hiba-e, avagy tendenciaszerű, és máshol is megjelenik.

Előnyei: Ingyenes! Bárki hozzáférhet, minimális adatfeldolgozást igényel, és majdnem a teljes bolygó szárazföldi területei rendelkezésre állnak. Kis és közepes méretarányú térképekhez, tájegységnyi elemzésekhez szükséges domborzatmodellnek jól alkalmazható.

Hátrányai: Az eddig bemutatottakhoz képest kis felbontású, alacsony pontosságú. Nagy méretarányú térképezésre nem alkalmas.

6.3.5 A LiDAR felmérés értékelése

A LiDAR felmérés abszolút pontossága több tényezőtől függ, melyek a lézerletapogatást végző repülőgép (és azon belül a letapogató berendezés) helyzetének meghatározását befolyásolják. Mint tapasztaltam, ez a technológia sem „csodaszer”. Ugyanakkor a letapogatás relatív pontossága valóban centiméteres nagyságrendű, így a mikrodomborzati formák megfigyelésére különösen alkalmas.

Előnyei: A legrészletesebb modell ezzel állítható elő. Megfelelő beállítások esetén pontossága nem marad el a GPS-es mérés pontosságától.

Hátrányai: Igencsak drága eljárás, ráadásul a megrendelése, elkészítése, kiértékelése is hosszas folyamat. Alkalmazása csak nagy területek esetén kifizetődő, ebből következik, hogy megrendelésre jellemzően csak nagy cégek vagy az állam képesek. A nagy adatmennyiség kezelése is egy lehetséges problémaforrás.

6.3.6 Összefoglaló értékelés

A tapasztalatok alapján készítettem egy táblázatot, melyben 100-as skálán pontoztam a különféle módszereket pontosság, időigény és költségigény alapján.

P O N T O Z Á S					
technológiák	pontosság %	időigény (mérés, h)	időigény (feldolgozás, h)	időigény %	felszerelés ára %
<i>LiDAR</i>	<i>(150)</i>	<i>megrendelésre</i>		<i>(jóval több)</i>	---
GPS 1	100	9	2	70	100
GPS 2	75	5		50	
GPS 4	37	3		30	
TOPO	20	8	3	70	40
BM1 BM2	15	10	5	100	5
SRTM	8	---	2	15	2

5. táblázat

A technológiák vizsgálatánál nem szabad elfelejteni, hogy „jónak” vagy „rossznak”; „alkalmasnak” vagy „alkalmatlannak” minősíteni mindig az adott cél tükrében lehet csak. A feladat dönti tehát el, hogy egy technológia megfelelő-e.

Hiába kapott például az SRTM pontosság szempontjából 100-ból csak 8-at, turistatérképek készítéséhez ez a pontosság tökéletes. És hiába értékelttem a LiDAR pontosságát a legnagyobbra, ha az adott feladat során arra a pontosságra nincs szükségünk.

Salzburgi tanulmányaim során egyik oktatómtól hallottak ezt jól példázzák. Elmondta, hogy az Osztrák Államvasutak (ÖBB) megrendelte a vasútvonalainak LiDARos felmérését. A felmérés el is készült, de a megrendelésben olyan magas pontsűrűséget adtak meg, ami végül feleslegesen sok és nehezen kezelhető adatmennyiséget eredményezett.

Ha a domborzatmodellből készítendő szintvonalrajz előállításához szeretnénk megfelelő mérési eljárást kiválasztani, figyelembe kell venni a készítendő térkép méretarányát, a terület domborzati viszonyait és ennek fényében meg kell választani a térkép alapszintközét. Az alapszintköz ismeretében tudunk ugyanis pontossági elvárásokat támasztani.

A T.1. Topográfiai Szabályzat magassági értelmű megengedett középhibák táblázata nyomán, valamint a topográfiai terepgyakorlaton ismertett szabály szerint: „*a hibahatár az alapszintköz harmada*”. Ebből a szabályból kiindulva az alapszintköz és a fent megismert pontossági paraméterek ismeretében tehát kiválasztható a legmegfelelőbb módszer. Ehhez nyújt segítséget a következő táblázat:

terület jellege	lejtőszög		1m esés vízsz. távon	alapszintköz [m]	középhiba [m]
	átlagos [°]	közepes [°]		M=1:10000	
sík, mikrodomborzat nélküli	0 - 1	1	70	1	0,3
buckás, mikrod., morotvás	1 - 3	2	30	2	0,6
dombvidék	3 - 8	5	10	2,5	0,8
hegyvidék	8 - 14	10	6	5	1,6
magashegység	14 - 40	20	3	10	3,3

6. táblázat

A megfelelő mérési módszer kiválasztását egy számpéldán mutatom be.

Legyen a feladat például a mintaterületemről készítendő, 1:5000-es méretarányú topográfiai térkép (melyet a topográfiai gyakorlat során készítenek a hallgatók) szintvonalrajzának elkészítése.

A táblázatban az 1:10000-es méretarányra találhatóak javasolt alapszintközök. Az 1:5000-es méretarányhoz ezen értékek felét kell használni. A területet erős dombvidéknek véve 2 méteres alapszintközt célszerű választani. Ennek harmada 0,67 méter, vagyis a felmérés pontossági követelményeinek megfelel a LiDAR és a GPS 1-4 mérések, még éppen megfelel a topográfiai és az első barometrikus felmérés. Gyakorlati szempontból a LiDAR-t választani luxus, a topográfiai felmérés alkalmazható, de elavult, a barométeres felmérést csak ideális körülmények között (szélcsend!) lehetne használni, tehát a legjobb a GPS-es technológia. A pontossága ismeretében megfelel a célnak a GPS 4 mérés, sőt még nagyobb sorközt is választhatunk, például 50m-es sortávolságot 15 másodpercenkénti rögzítéssel.

7. Összegzés

Szakdolgozati feladatorként egy 500x400 méteres, változatos domborzatú területről gyűjtöttem és hasonlítottam össze magassági adatokat. Az adatokat különböző forrásokból merítettem, részben saját, részben korábbi mérések felhasználásával. A szempont az volt, hogy több különböző technológiát hasonlítsak össze azonos körülmények között, és vizsgáljam a pontossági szempontoknak való megfelelésüket.

Öt mérési technológia összesen nyolc mérést vontam be a vizsgálatba. Különös figyelmet szenteltem egy saját magam által kidolgozott mérési módszernek, melynek során a magasságmeghatározást légnyomásmérésből vezetem le. A mérési technológiákról kialakult tapasztalataimat – a teljesség igényének teljes elutasításával – így jellemezhetem egy-egy szóban:

LiDAR – Legdrágább, de a legrészletesebb.

GPS – Eszközigényes, de a legpontosabb.

Topográfiai – Elavult, de a legtanulságosabb.

Barometrikus – Bizonytalan, de a legolcsóbb.

SRTM – A legkevésbé részletes, de ingyenes.

Megállapíthattam azt is, hogy tökéletes technológia nincs. Mindnek megvannak az előnyei és hátrányai, választani mindig az adott feladatnak megfelelően kell.

A vizsgálat melléktermékeként elemeztem a felhasznált szoftver interpolációs lehetőségeit és ezek hatását a pontosságra. Megállapítottam, hogy hatásuk nem jelentős a technológiák közti eltérésekhez képest, így azok vizsgálhatók egy adott interpolációval és rácsmérettel (pl. kriging, 2m) anélkül, hogy tartani kéne attól, hogy más beállításokkal jelentősen eltérő eredményt kapnánk.

Kitekintésként megemlíteném egyrészt, hogy a barometrikus mérés még tartogat magában bőven finomítási lehetőségeket. Esetleg feldolgozóprogramot is lehetne hozzá írni. Másrészt a különbségmodellek lokális vizsgálatával részletesen nem foglalkoztam, de érdekes lehetne kimutatást készíteni egy-egy részterület jellemzőiről az egészhez képest. Ugyanígy érdekes lenne a GPS-szel úgy végigjárni egy kisebb területet, hogy a pontsűrűség közel azonos legyen a LiDAR pontsűrűségével, és úgy vizsgálni a

különbséget. Ki lehetne még egészíteni a technológiák sorát az ugyanerre a területre végzett fotogrammetriai térkiértékeléssel és MADOP domborzatmodell bevonásával, az SRTM-hez hasonló, valamivel nagyobb felbontású ASTER adatokkal stb.

Köszönetnyilvánítás

Szereték köszönetet mondani konzulenseimnek: Balázsik Valériának és Tarsoly Péternek munkámhoz nyújtott segítségükért és türelmükért.

Ezúton köszönöm meg hallgatótársaimnak: Németh Dorottyának és Dán Krisztiánnak, hogy az októberi és májusi terepi mérési napokon mindenben számíthattam rájuk.

Köszönet illeti Borsós Ábelt, hogy sokszor és sokadszorra is több hétre kölcsönadta GPS készülékét; Halász Dórát a lehetőségért, hogy a barometrikus felmérést egy gyakorlati alkalmazásban is kipróbálhattam, és nem utolsósorban édesanyámat a nyelvhelyességi lektorálásért.

Kelt: Székesfehérvár, 2012. június 5.

.....
Miklós Ákos

8. Irodalomjegyzék

1. Blaschke, Thomas: Advanced Remote Sensing – előadásvázlat
(*Universität Salzburg, Naturwissenschaftliche Fakultät, Salzburg, 2011.*)
2. Bódis Katalin: Digitális domborzatmodellek és alkalmazási lehetőségeik az árvízi kockázatkezelésben
(*Doktori /Ph.D./ értekezés; SZTE-TIK, Szeged, 2008.*)
3. Borza Tibor – Gerő András – Mohos Zoltán – Szentpéteri László: GPS mindenkinek
(*Sztrato Kft., Budapest, 2005.*)
4. Busics György – Műholdas helymeghatározás
(*TÁMOP digitális jegyzet; Székesfehérvár, 2011.*)
5. Elek István: Bevezetés a geoinformatikába
(*ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2006.*)
6. Dr. Mélykúti Gábor: Topográfia
(*TÁMOP digitális jegyzet; Székesfehérvár, 2011.*)
7. Zentai László: Számítógépes térképészet
(*ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2000.*)

8. Farkas Gábor: Digitális domborzatmodellek összehasonlító vizsgálata
(*Szakdolgozat; Székesfehérvár, 2010.*)
9. Máté Emőke: Magasságfelmérés és domborzatmegjelenítés módszereinek bemutatása az Iszka-hegyi mintaterületen
(*Szakdolgozat; Székesfehérvár, 2010.*)
10. Tunyogi Richárd: A domborzatfelmérés és -megjelenítés módszereinek bemutatása az Iszka-hegyi mintaterületen.
(*Szakdolgozat; Székesfehérvár, 2009.*)

11. LiDAR felmérés projektdokumentációja
(*TopoSys GmbH, 2008.*)