

**LIDAR ÉS TOPOGRÁFIAI TÉRKÉP ALAPÚ DIGITÁLIS  
TEREPMODELLEKBŐL LEVEZETETT, ILLETVE KÉZZEL  
DIGITALIZÁLT TÖBÖR-KÖRVONALAK MORFOMETRIAI  
ÖSSZEHASONLÍTÁSA AZ AGGTELEKI-KARSZT PÉLDÁJÁN**

**COMPARISON OF DOLINE CONTOURS DERIVED FROM LIDAR  
AND TOPOGRAPHIC MAP BASED DTM-S WITH DOLINE  
CONTOURS CREATED BY MANUAL DIGITISATION, THE CASE  
EXAMPLE OF AGGTELEK KARST**

**LÁTOS TAMÁS<sup>1</sup> – TELBISZ TAMÁS<sup>1</sup> – DEÁK MÁRTON<sup>1</sup> – SZÉKELY  
BALÁZS<sup>2</sup> – KOMA ZSÓFIA<sup>2</sup> – STANDOVÁR TIBOR<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ELTE Természetföldrajzi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány sétány 1/C.

<sup>2</sup>ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány P. sétány  
1/C.

<sup>3</sup>ELTE Növényrendszertani és Ökológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány P.  
sétány 1/C.

[latostamas@gmail.com](mailto:latostamas@gmail.com)

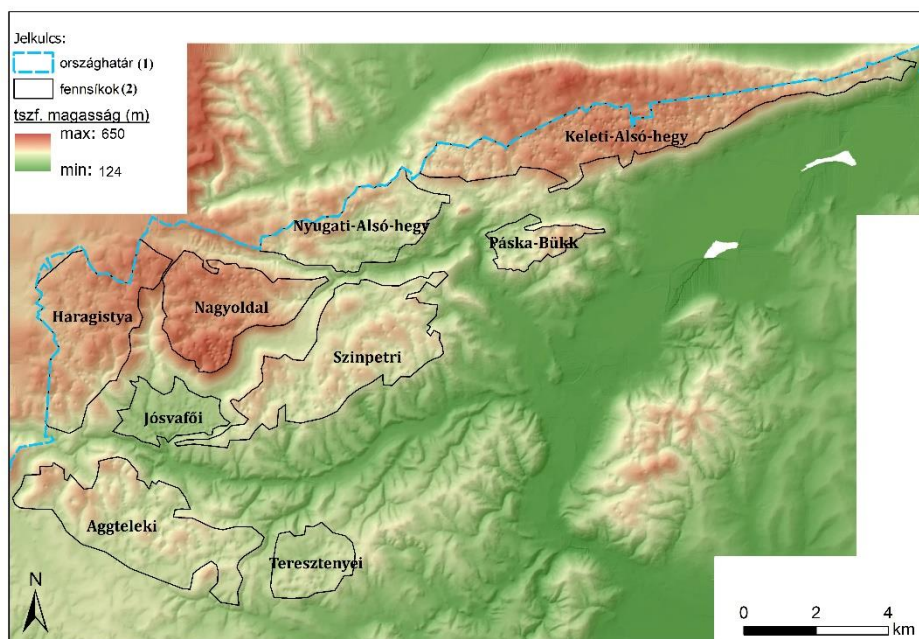
*Abstract: An advantageous consequence of the rapid evolution of topographic data acquisition techniques is possibility to define the topography with increasingly higher accuracy. New remote sensing techniques and data processing methods allow to detect microtopographic features of karst phenomena with unprecedented precision. Our aim in this study was to compare the digital terrain models (DTMs) generated from various data sources acquired by different technologies to define dolines in the Hungarian part of the Gömör-Torna karst. An automated method of doline recognition is presented here; the results of this processing technique is compared to that of the classic outlining. We compared the three doline database using geomorphometric tools. Our conclusion is that, however, the classic method is efficient, but the LiDAR DTM-based method is more accurate in detecting and analyzing dolines*

## **Bevezetés**

A karsztmorfológiai kutatások egyik fő célpontját napjainkban is a töbrök jelentik, melyeket *FORD – WILLIAMS* (1989) alapján a karsztok diagnosztikus felszínformáinak tekintünk. A módszertan azonban folyamatosan fejlődik, mióta *WILLIAMS* (1971) már több mint négy évtizede lefektette az ilyen irányú kutatások alapjait. Az alapvető vizsgálandó morfológiai paraméterek meghatározhatók a bőséges szakirodalom alapján (*MILLS – STARNES* 1983; *MEZŐSI* 1984; *KEMMERLY* 1986; *VINCENT* 1987; *WHITE* 1988; *FORD – WILLIAMS* 1989; *BÁRÁNY-KEVEI – MEZŐSI* 1993; *FARSANG – M. TÓTH* 1993;

*PÉNTEK* et al. 2000; *DUTKÓ* 2000 stb.), amelyek közül mi a következőket használtuk:

- egyedi morfológiai jellemzők: terület, kerület, mélység, kerekítettség, kompaktság, vízszintes megnyúltság, mélység-átmérő arány, hossz tengely azimutja.
- területi jellemzők: töbörszám, töbörűrsűrűség, töbörösödési arány.



1. ábra: Az Aggteleki-karszt vizsgált fennsíkjai

Fig. 1: The studied plateaus of Aggtelek Karst; 1: state border; 2: plateaus.

Vizsgálati területünk a Gömör-Tornai-karszt Magyarországra eső része volt a Szalonnai-karszt kivételével, mivel ez utóbbiról nem áll rendelkezésünkre a LiDAR adatforrás (1. ábra). Számos munka született már korábban a Gömör-Tornai-karszt rész-, vagy adott esetben teljes területéről térinformatikai-statisztikai módszereket használva (*MEZŐSI*, 1984; *TELBISZ* 2001; *MARI* 2003; *TELBISZ* 2003; *TELBISZ* 2004; *ZBORAY – KEVEINÉ* 2004; *TELBISZ – MÓGA* 2005; *TELBISZ* et al. 2006; *TELBISZ – ÁDÁM* 2011), esetünkben az újdonságot az jelenti, hogy LiDAR alapú domborzatmodellt is használtunk, valamint igyekeztünk kifejleszteni egy automatizált töbörlehatárolási módszert térinformatikai alapon. Hasonló próbálkozásokra a szakirodalomban is találni példákat (*MONTANÉ* 2002; *KOBAL* et al. 2014). A klasszikus töbörlehatárolási módszer szerint

megfelelő méretarányú topográfiai térképről a legkülső zárt szintvonal digitalizálásával előállítható egy adott terület töbr-adatbázisa. Ezzel a módszerrel azonban több probléma is adódhat:

- a térkép generalizáltsága miatt a morfometriai mutatók vizsgálata pontatlan adatokon alapszik.
- a nem elég nagy méretarányú térképek használata miatt a kisebb töbrök kimaradhatnak az adatbázisból.
- a legkülső zárt szintvonal nem pontosan tükrözi a töbr peremét.

A töbr peremét morfológiai értelemben legpontosabban a görbület alapján határozhatjuk meg, ám ez sok esetben nem teljesen egyértelmű definíció. Másik lehetőség, hogy a perem legalacsonyabb pontjának megfelelő szintvonallal határozzuk meg, ami egyértelmű és térinformatikailag is könnyebben alkalmazható módszer.

Jelen tanulmány a fenti hibalehetőségek mértékét igyekszik feltárni, több adatforrásból levezetve és összehasonlítva a töbrök morfometriai jellemzőit, ehhez pedig az automatizált levezetés adja az alapot azzal, hogy a töbrök a valós domborzati viszonyok alapján kerülnek lehatárolásra. A kutatás tehát a következő kérdésekre keresi a választ:

- milyen egyezések/különbségek mutathatók ki ugyanazon töbrök morfometriai paramétereinek összevetése során három különböző alapadatból levezetve a töbröket?
- lehetséges-e a töbrök automatizált lehatárolása digitális domborzatmodell alapján?
- használható-e a LiDAR-alapú DTM töbrlehatárolásra és morfometriai elemzésre?

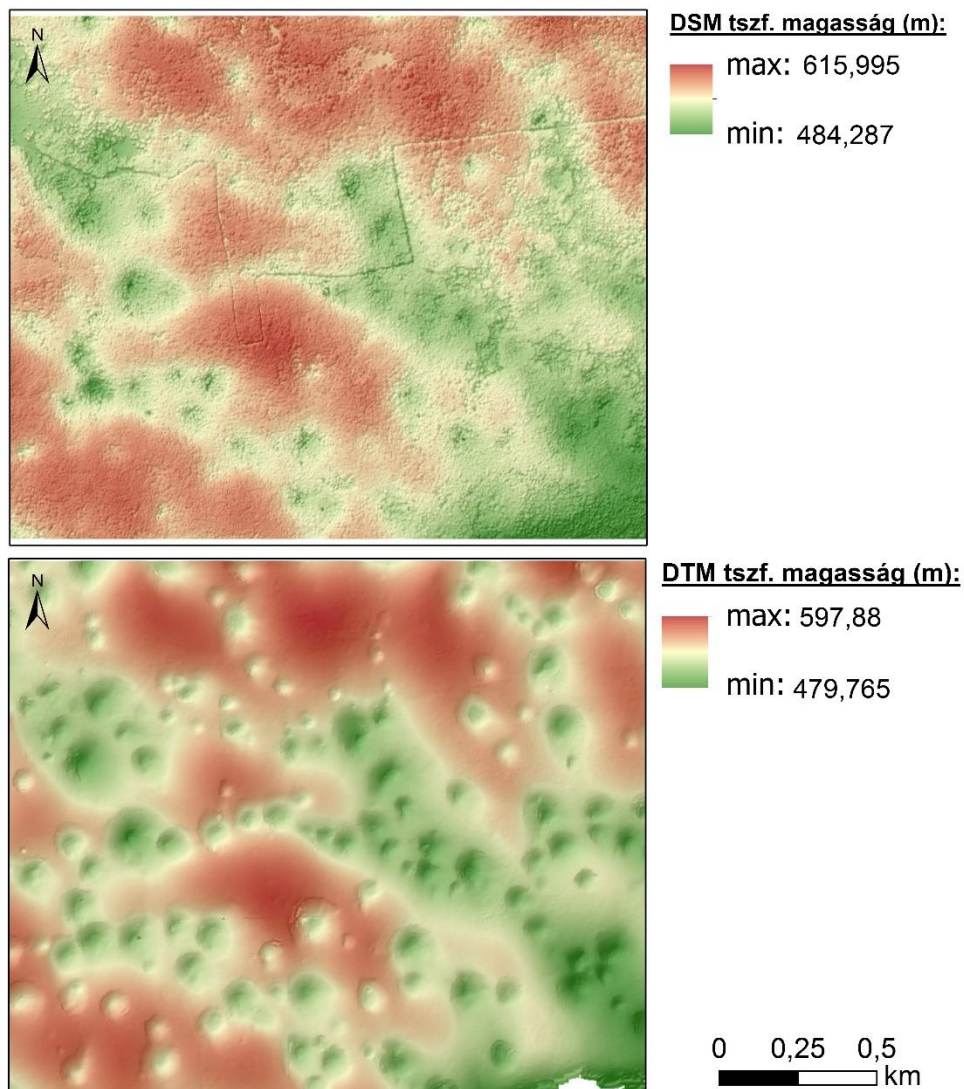
### **Adat és módszer**

A kérdésfelvetésben említett három különböző adatforrás/adatnyerési eljárás a következő volt:

1. Klasszikus módszer (a továbbiakban erre a „TOPO” rövidítéssel hivatkozunk): 1:10 000 méretarányú topográfiai térképről a legkülső zárt szintvonal digitalizálásával. Ebben az esetben a töbrperem és a töbr aljának magassági értéke is a térkép alapján lett meghatározva.
2. Kriging interpolációval létrehozott DTM-ből levezetett töbrök (továbbiakban: „KRIG”): szintén az 1:10 000 méretarányú topográfiai térkép alapján, a szintvonalak és a magassági pontok digitalizálásával, kriging interpolációval előállított, 10 m felbontású digitális terepmodell jelentette az alapot. A kriging módszer számos korábbi vizsgálat alapján az egyik legjobb interpolációs módszer (bővebben lásd *TELBISZ* et al.

2013). A töbrök lehatárolása az automatizált módszerrel történt (lásd később).

3. LiDAR-alapú DTM-ből levezetett töbrök (továbbiakban: „LIDAR”): a terület felvételezésére 2013-ban került sor a Károly Róbert Főiskola által, az Aggteleki Nemzeti Park megbízásából. Az adatok előfeldolgozása, osztályozása, interpolációja az OPALS nevű szoftverrel történt. Az így előállított digitális felszínmodell (DSM) 1 m/px terepi felbontású volt, amely 2,5 m/px-re lett módosítva. A talajpontok leválogatásával és interpolációjával szintén 2,5 m/px felbontású digitális terepmodellt (DTM) hoztunk létre (2. ábra). A DTM több helyen adathiányos volt a felvételezés módszeréből és a sűrű növényzetből adódóan, jellemzően a meredek oldallejtőkön a fennsíkok peremén, illetve a völgyoldalakon, így ez a töbröket alapvetően nem érintette. Ezen hibák javítására két lépésben 5, illetve 15 pixeles méretű mediánszűrőt alkalmaztunk. Mivel a felmérés a Szalonnai-fennsík területére nem készült el, ezért ez a terület az egész elemzésből kimaradt. A töbrök lehatárolása ebben az esetben is az automatizált módszerrel történt.

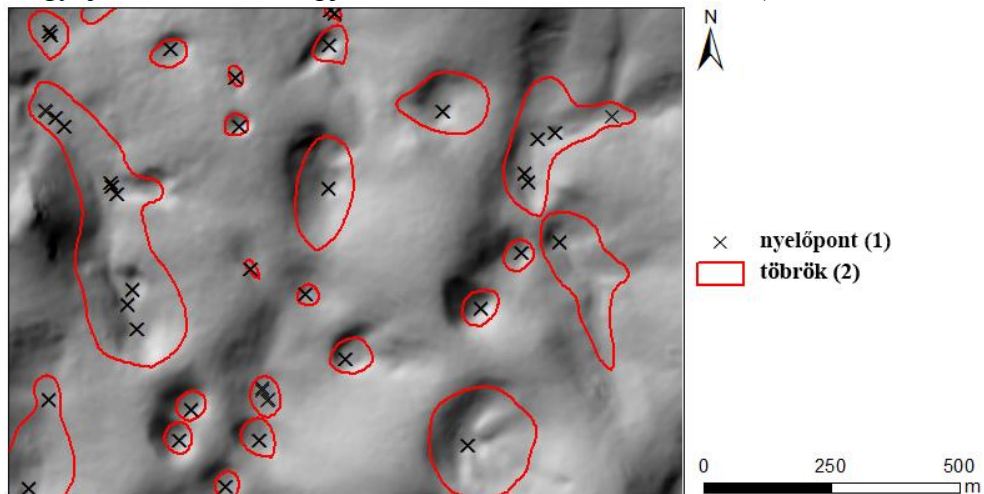


2. ábra: A LiDAR mérésből létrehozott DSM és DTM között jól látszik a növényborítás okozta különbség. Kivágat az Alsó-hegy egy részéről. A DSM-en az országhatár vonala is jól megfigyelhető.

Fig. 2: Difference between the LiDAR DSM and the LiDAR DTM at the northern area of the Alsó-hegy. The border-line appears on the DSM.

A két DTM-ből a töbrök levezetéséhez használt automatizált módszer az ESRI ArcMap 10.2.2 szoftver *Hidrology* eszköztárán alapszik és a következőképp foglalható össze:

- Simító szűrő (*Mean*) alkalmazása 5 px-s ablakmérettel, kizárólag a LiDAR DTM esetében az apró egyenetlenségek simítására, amelyek később hibát okozhatnak.
- Lefolyási irányok meghatározása a területre (*Flow direction*), ez több következő eszköznek az egyik bemenő adatforrása lesz.
- A területre eső töbrök nyelőpontjainak meghatározása (*Sink*). Az eszköz működési elve, hogy leválogatja azon pixeleket, amelyek olyan helyzetben vannak, hogy minden szomszédos pixel nagyobb magassági értékkel rendelkezik náluk.
- A kapott raszter alapú pontok vektoros formátumba konvertálása (*Raster to point*).
- A leírt módszer természetesen nem csak a töbrök legmélyebb pontjait eredményezi, hiszen a fenti pixel-szomszédságon alapuló állítás más formákra is igaz lehet, illetve a DTM előállításánál generált hibák is előidéznek nem valós nyelőpontokat. A valós töbrö-nyelőpontok leválogatása sajnos egyelőre csak manuális úton valósítható meg. Ehhez a domborzatárnyékolt rasztert, valamint a DTM-ből generált szintvonalakat használtuk alapként, mivel ezek együttes alkalmazásával egyértelműen eldönthető, hogy töbröhöz tartozik-e az adott pont. Mivel egy nagyobb kiterjedésű töbrö (uvala) esetén nem ritka, hogy több nyelőponttal is rendelkezik, ezért szükséges az egy töbröhöz tartozó több nyelőpont azonos egyedi azonosítóval való ellátása, mivel a vízgyűjtő lehatárolás alapja ez lesz a későbbiekben (3. ábra).



3. ábra: Egy töbröhöz esetenként több nyelőpontot is hozzárendel az eljárás.

Fig.3: Some dolines have more sinkholes by using the "Sink" tool; 1: sinkhole; 2: doline.

- a véglegesített nyelőpont adatbázis segítségével a pontokhoz tartozó vízgyűjtő területek kinyerése (*Watershed*).
- ezután a vízgyűjtő területekhez egységesen hozzárendeljük a határuk legalacsonyabb pontjának magassági értékét, megkapva ezzel a töbröperem kifolyási pontját (*Zonal fill*).
- az így kapott raszterből kivonjuk az eredeti domborzatmodellt (*Raster calculator*), majd leválogatjuk azokat a pontokat, amelyek pozitív pixelértékkel rendelkeznek, megkapva ezzel a töbrö területét alkotó pixeleket.
- az eredményül kapott raszteres állományt vektoros formátumba konvertáljuk, mert a morfolometriai adatok egy részét ez alapján könnyebb meghatározni (*Raster to polygon*), majd egy simítást végzünk rajta a pixelek mentén történő lehatárolás miatt kialakuló szögletesség kiküszöbölésére (*Smooth polygon*).

A fenti eljárást végrehajtottuk a krigeléssel kapott DTM-re és a LiDAR-alapú DTM-re is.

Elemzésünk első célja az egymásnak konkrétan megfeleltethető töbrökről kapott adatok összehasonlítása volt. Ehhez kétféle leválogatásra volt szükség az eredményül kapott töbröadatbázisokból. Egyrészt ki kellett válogatni a három adatbázisból azokat a töbröket, amelyek fedik egymást, tehát ugyanazt a formát képviselik, viszont törölni kellett azokat mindegyik adatbázisból, amelyek nem szerepeltek mind a háromban egymásnak megfeleltethető módon. Ennek oka számos esetben az volt, hogy valamelyik eljárás ugyanazt a formát több töbröként értelmezte, míg a másik összevontan csak egyként. Így végül 947 darab egymással összevethető töbröt tudtunk vizsgálni az elemzési területen.

Az elemzések másik módszere a területi alapú vizsgálatokat jelentette, mellyel a különféle módon nyert adatok töbrö-sűrűségi és töbrösödési aránybeli különbségeit kívántuk megragadni. Ehhez az elemzéshez egyrészt szükség volt a fennsíkok lehatárolására. Ez lejtőszög térkép alapján történt meg, illetve ahol a fennsíkhöz közel helyezkedett el egy völgyi töbrörsor, ott azokat a területeket is még hozzávettük az adott területi egységhez. Ezt követően csak a lehatárolt elemzési területekre eső töbrökkel számoltunk, de ez esetben nem volt fontos, hogy az egyes töbrök megfeleltethetők legyenek egymásnak, így a három adatbázis értelemszerűen különböző számú elemmel rendelkezik az egyes részterületekre vonatkozóan.

A területi elemzésekhez szükség volt a lehatárolt egységeken belül a „töbrösödésre alkalmas területek” leválogatására. Ehhez készítettünk egy

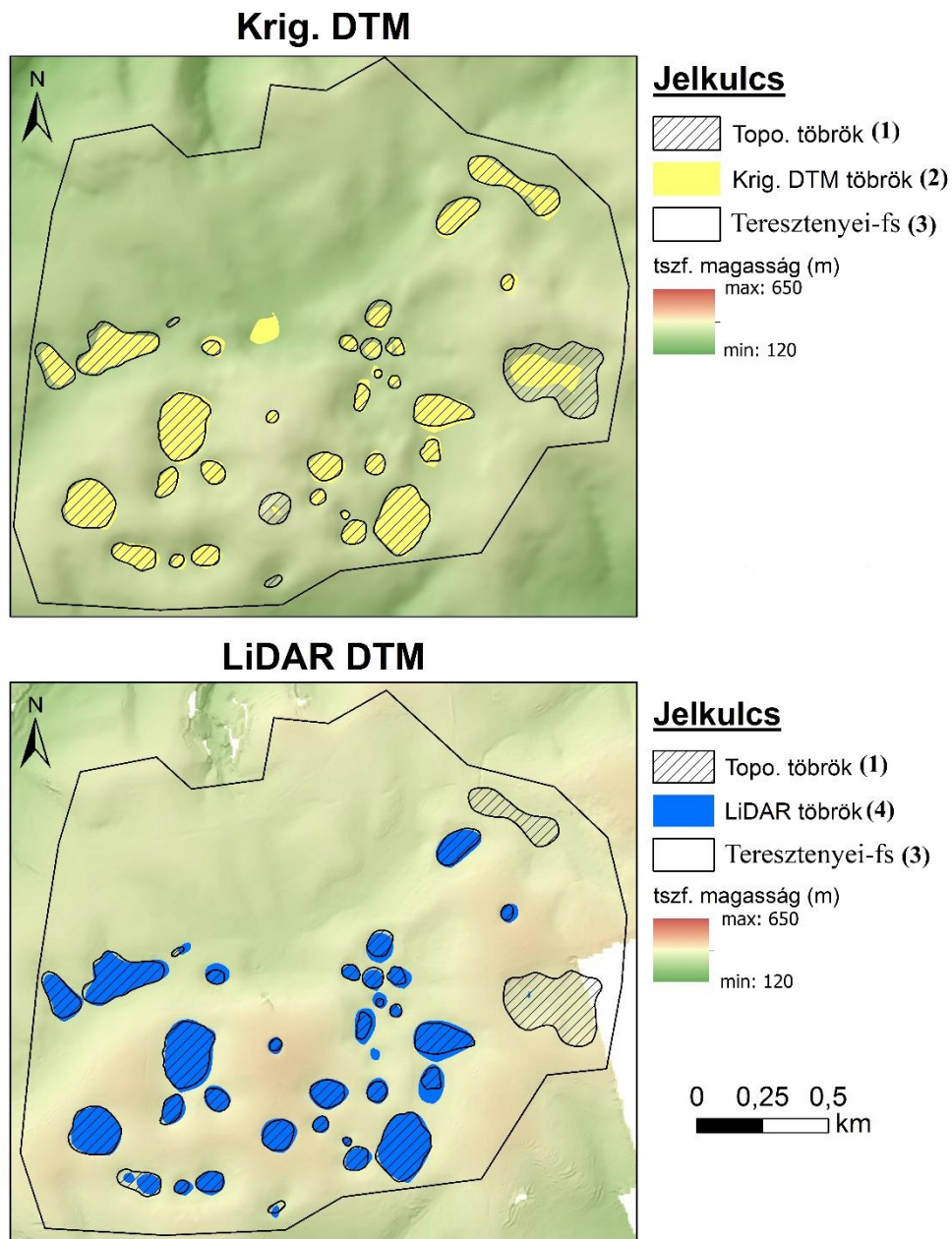
simított domborzatmodellt 9 pixeles átlag szűrővel a krigelt DTM alapján, ami így a kisméretű, de meredek formákat nem tartalmazza, és ennek alapján határoztuk meg a térszín általános lejtőszögét. Majd hisztogramot készítettünk a töbrök nyelőpontjainak általános lejtőszög-értékeiből és ez alapján  $10^\circ$ -t kaptunk határértéknek, a töbrök 96%-a ennél kisebb lejtésű területen helyezkedik el, így a továbbiakban a fennsíkok „töbrösödéssé alkalmas területének” a  $10^\circ$ -nál kisebb általános lejtésű térszíneket tekintettük, és erre határoztuk meg a sűrűségi értékeket.

## Eredmények

Csupán az eredménytérképeket szemlélve, amelyen mind a három adatforrásból levezetett töbrök láthatók, is levonhatók következtetések az alapadatokat és a módszereket illetően.

Összességében a lehatárolt töbrök mindhárom módszer szerint igen jó egyezést mutatnak, a részletekben azonban sok kis eltérést figyelhetünk meg. darabszámban és körvonalban is. A nyári időpontú, ökológiai célú felvételezés eredményeként a dús növényborítottság a LiDAR DTM adatokban több területen adathiányt eredményezett, ezért itt számunkra használhatatlan volt. A szakadások (adathiány) mentén így a töbrök kimutatása nem volt lehetséges. Általánosságban elmondható, hogy a LiDAR és a krigelt DTM-ből levezetett töbrök jó területi egyezést mutatnak, de előfordulnak általános különbségek is. Több helyen látható, hogy a LiDAR-alapú módszer nem talált meg nagyobb kiterjedésű, de sekély töbröket (4. ábra). Ezekben az esetekben a nyelőpont detektálása volt a probléma, ami adódhat a felvételezési pontok interpolációjának hibájából.

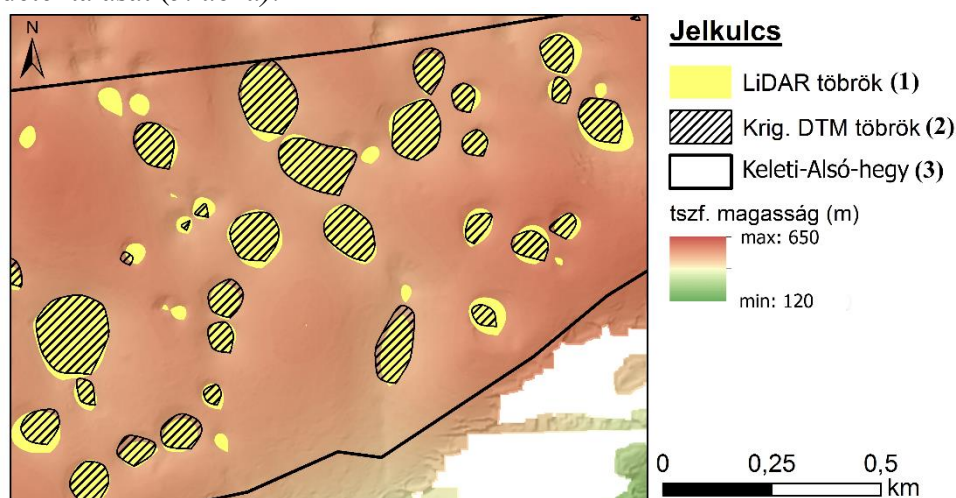




4. ábra: LiDAR és krigelt DTM alapján levezetett, valamint a topográfiai térkép alapján megrajzolt töbrök közti különbségek.

Fig. 4: Differences between the dolines of the Topo, Krig and LiDAR database; 1: dolines of Topo; 2: dolines of Krig DTM; 3: Teresztenyei plateau; 4: dolines of LiDAR DTM.

Másik szembeötlő eltérés, hogy a LiDAR DTM alapján történt lehatárolás jóval nagyobb mennyiségű töbröt eredményezett, mint a krigelt DTM, vagy a klasszikus módszer alapján történő levezetés. Ennek oka a felbontásban keresendő. A LiDAR DTM terepi felbontása 2,5m/px, míg a krigelt DTM-é 10 m/px. Ebből logikusan következik, hogy előbbi adatforrás jóval nagyobb számban eredményezte a kisebb kiterjedésű töbrök detektálását (5. ábra).

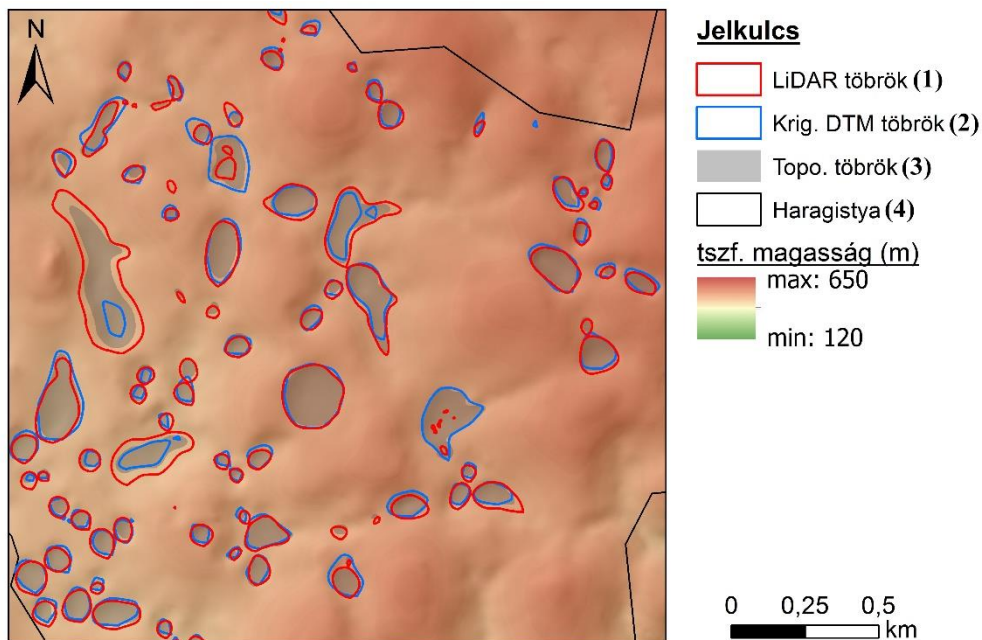


2. ábra: A LiDAR DTM-ből levezetett adatbázis számos kisebb kiterjedésű töbröt tartalmaz, amik a KRIG adatbázisból hiányoznak.

Fig. 5: The LiDAR database has several smaller dolines, which are missing from the Krig database; 1: dolines of LiDAR DTM; 2: dolines of Krig DTM; 3: Keleti-Alsó-hegy.

Ezek mellett számos eltérés figyelhető meg, például előfordul, hogy a klasszikus módszer és a krigelt DTM-ből való levezetés egy töbröt eredményezett egy területen, míg a LiDAR DTM eredménye több apró formát mutat ennek helyén. Látható erre ellenpélda is, amikor a krigelt DTM alapján került lehatárolásra több töbör olyan területen, ahol a LiDAR csak egy nagyobbat mutat (6. ábra).

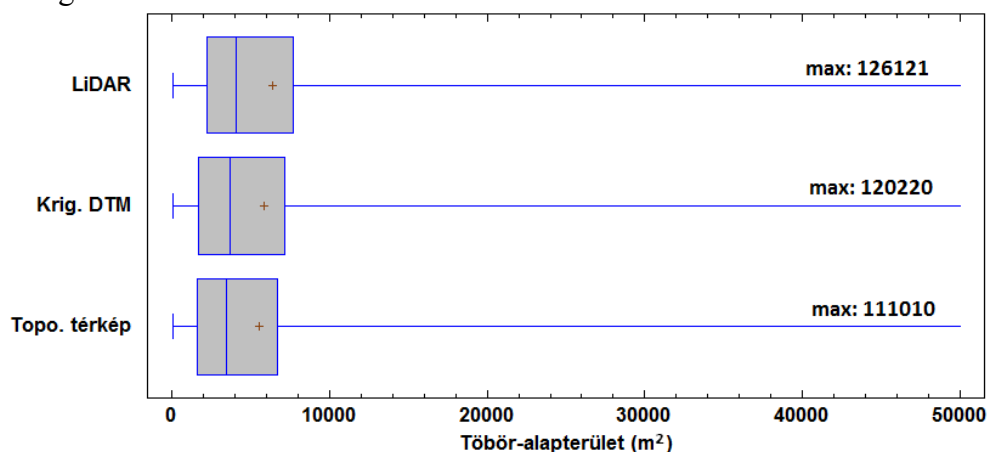
Előbbi esetben megint a felbontásban keresendő a válasz, a LiDAR nagyobb pontosságának köszönhetően precízebben tudja megmutatni a lehetséges nyelőpontokat. Utóbbi eset valamelyik domborzatmodell előállításánál alkalmazott interpolációs eljárás okozta eltérés lehet.



3. ábra: Számos példa látható a három alapadatból levezetett töbrök közti eltérésekre.

Fig. 6: Differences between the three doline databases; 1: dolines of LiDAR DTM; 2: dolines of Krig DTM; 3: dolines of Topo database; 4: Haragistya plateau.

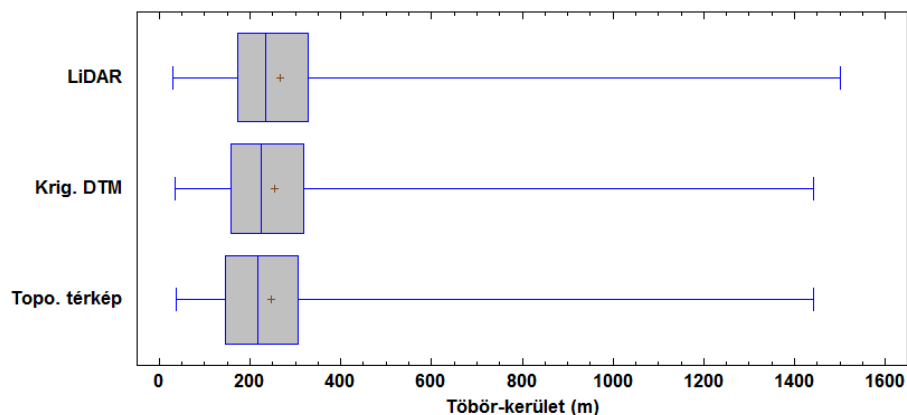
A három alapadatból levezetett és előállított töböradatbázis összevetése morфомetriai mutatókon keresztül valósítható meg leginkább. Az elemzések során 947 darab, egymásnak megfelelő töbör került vizsgálat alá.



7. ábra: Töbör-alapterületek eloszlása a három adatbázis alapján.

Fig. 7: Distribution of doline area by the three databases.

- **Töbör-alapterület:** a töbör-alapterületek eloszlása érdekes képet mutat, a három adatbázis értékeinek mediánja és átlaga hasonló nagyságrendbe esik, viszont a LiDAR adatok nagyobb értéket mutatnak a másik kettőnél. Ez azért lehet meglepő, mivel az imént jelentettük ki, hogy a LiDAR jóval több kisméretű töbröt detektált. Viszont, mivel a három adatbázis összevetésébe csak azok a töbrök kerülhettek bele, amelyet mindhárom módszer megtalált, ezért ezek a kisméretű formák kimaradtak a statisztikai elemzésből. A magyarázat arra, hogy átlagosan miért nagyobb területű a többi töbör a LiDAR adatbázisban az lehet, hogy a nagyobb felbontás pontosabb peremlehatárolást tett lehetővé, mint a krigelt DTM esetében, a klasszikus módszer pedig a legkisebb zárt szintvonal elve alapján dolgozott, ami mindenképpen valamivel szűkebb lehatárolást jelent, mint a perem legalacsonyabb pontja alapján meghatározott alak. Ennek ellenére a TOPO és a KRIG módszerrel kapott töbrök-alapterületek átlagai szoros egyezést mutatnak (7. ábra).

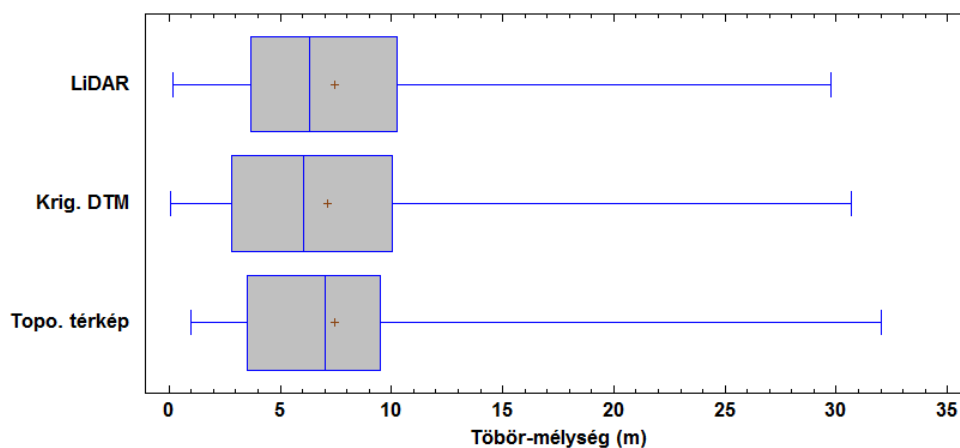


8. ábra: Töbörkerületek eloszlása a három adatbázis alapján.

Fig. 8: Distribution of doline perimeter by the three databases.

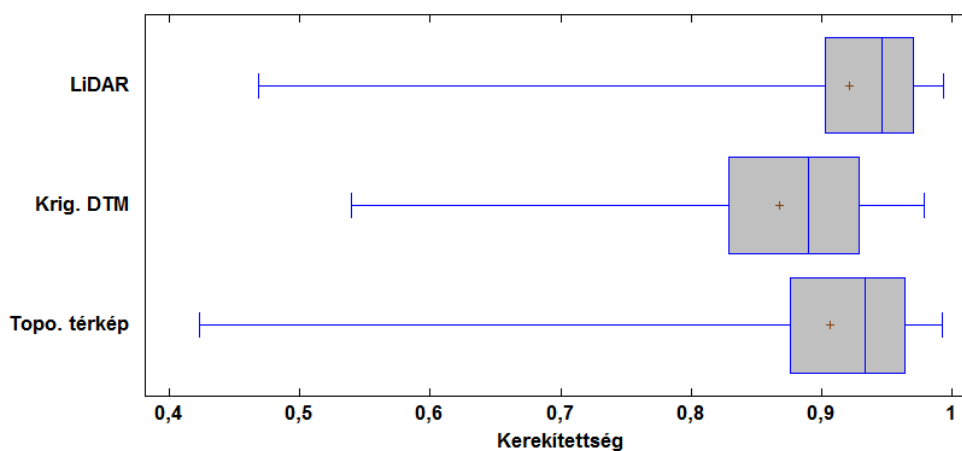
- **Töbörkerület:** a töbörkerületek elemzése gyakorlatilag ugyanazt az eredményt szolgáltatja, mint ami az imént látható volt a terület esetében és a magyarázat is megegyezik azzal (8. ábra).
- **Töbörmélység:** a töbörmélység esetében már némileg nagyobb különbség látható. A legnagyobb átlagértéket a klasszikus módszer alapján lehatárolt töbrök mutatják. Ennek oka, hogy a töbörperem és az aljzat magasságértékének leolvasása csak kerekítve, elnagyolva lehetséges a térképről. Ebben az esetben mutatkozik meg először a DTM-k igazi előnye a morfológiai elemzés során, hiszen ezek jóval pontosabb, a LiDAR esetében elmondható, hogy a valóságot igen jól

közelítő értékeket szolgáltatnak. A LiDAR és a KRIG közti eltérést ebben az esetben a felbontásbeli különbség okozza, de lényegi differencia nem látható az értékek között (9. ábra).



9. ábra: A töbör-mélység esetében látható az első jelentősebb eltérés, amely megmutatja a DTM, mint alapadat előnyét.

Fig. 9: The first significant difference appears in the distribution of doline depth data. This difference shows the benefit of the DTM as base data.



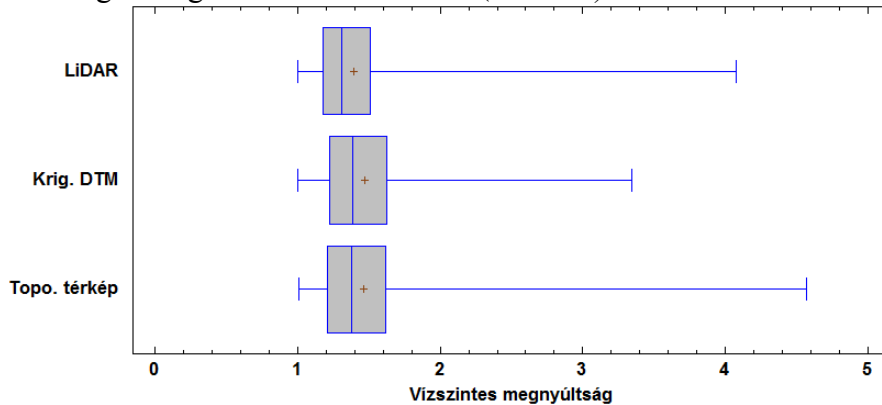
10. ábra: A kerekítettség értékek eloszlása mutatja a legnagyobb eltérést.

Fig. 10: The largest difference appears in circularity distributions.

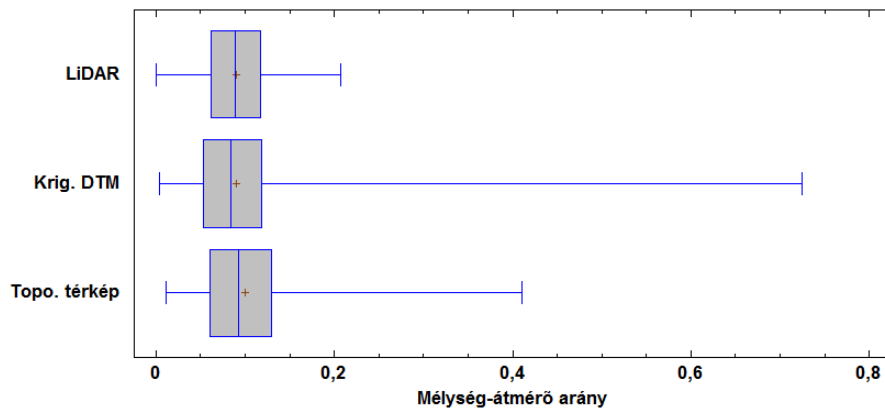
- **Kerekítettség** ( $= (4\pi \cdot \text{Terület}) / \text{Kerület}^2$ ): ez a mutató részben a formák megnyúltságát, részben a körvonal cikkcakosságát jellemzi, minél kisebb 1-nél, annál inkább eltér a forma a körtől (STRAHLER, 1964; TELBISZ 2003). Ebben az esetben tapasztalható a legnagyobb eltérés az

adatok között. A LiDAR és a topográfiai térképről digitalizált töbrök átlagértékei közel azonosak (10. ábra). A TOPO állomány töbrei azért közel köralakúak, mert a töbrök szintvonalai jellemzően lekerekített, ovális formaként jelennek meg a szintvonalas térképeken. A LiDAR esetében ismét a felbontásban keresendő a válasz, ez az állomány a töbrök tényleges, körhöz közelítő alakját adja vissza nagy pontossággal. A KRIG esetében az alacsonyabb értékek a gyengébb felbontásra és/vagy az interpolációra vezethetők vissza.

- **Vízszintes megnyúltság** (= hosszúság / szélesség): a vízszintes megnyúltság esetében az adatok közel együtt mozognak, viszont a LiDAR kis eltérést mutat a másik kettőhöz képest. Ez is azt támasztja alá, hogy a töbör alak a legpontosabbnak tekinthető LiDAR szerint átlagosan igen közel áll a körhöz (11. ábra).

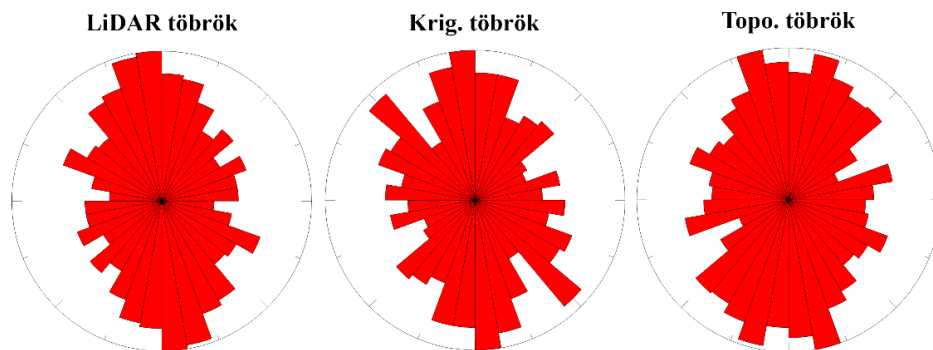


41. ábra: A vízszintes megnyúltság esetén kismértékű eltérések láthatók.  
Fig. 11: The distributions of horizontal elongation show slight differences.



12. ábra: A mélység-átmérő arány értékei elsősorban a maximum értékekben térnek el egymástól.  
Fig 12: The values of the depth-diameter ratio show differences mainly in the maximum values.

- A **mélység-átmérő arány** esetében a mélység adatok eloszlásánál tett megállapítások az érvényesek, ebből fakadóan a LiDAR és a KRIG adatok átlaga és mediánja együtt mozog, míg a TOPO állomány hasonló értékei valamivel magasabbak (12. ábra).
- **Hossztengely irányok:** a töbrök hossz tengelyének azimutjait megvizsgálva egyértelműen kijelenthető, hogy a töbrök jellemző irányultsága közel É-D-i dominanciájú ( $345^\circ/165^\circ$ ), ezt mindhárom adatsor értékei határozottan mutatják. Emellett a a KRIG adatsorán látható még egy kevésbé markáns ÉNy-DK-i irányultság, ami a másik két adatbázisnál nem érzékelhető (13. ábra).



5. ábra: Mindhárom adatsor rózsadiagramján markánsan megjelenik az elsődleges közel É-D-i orientáció és kevésbé intenzíven egy másodlagos ÉNy-DK-i irányultság a Krig esetén.

Fig. 13: Each rose-diagram shows a dominant near N-S orientation, and a secondary NW-SE orientation can be observed in the Krig dolines.

Töbrök hossz tengelyeinek azimutértékei közötti eltérések eloszlása (°)			
percentilis	LiDAR – Krig	Krig – Topo	LiDAR – Topo
25%	7,75	22,02	20,77
50%	23,21	43,60	40,06
75%	51,79	66,62	64,27

1. táblázat: A legkisebb eltérés az egyes töbrök hossz tengelyeinek azimut értékei között a két DTM állományt egymással összevetve mutatkozik; míg a Topo állomány töbreihez képest mind a Krig, mind a LiDAR hasonló eltérést mutat.

Table 1: The least differences in the doline azimuth appears between the values of the LiDAR and Krig database. Both DTM database show similar differences compared to the Topo values.

Emellett az egyes adatbázisok elemeinek azimut értékének eltérését töbrönként összevetve megállapítható, hogy a legkisebb eltérés a két DTM-alapú állomány töbrőértékei között mutatkozik, míg a TOPO állomány értékeivel összevetve őket közel azonos eltérést mutatnak ahhoz képest, ami

szintén a DTM-ből való levezetés pontosabb mivoltát támasztja alá (1. táblázat).

A részterületek összesített, átlagolt értékeit vizsgálva a töbör számokat tekintve elmondható, hogy a klasszikus módszer és a Krigelt DTM-ből levezetett töbörök száma megegyezik, előbbi adatbázis 1053, míg utóbbi 1052 darabot tartalmaz. A LiDAR DTM esetében azonban már jelentősebben eltér ez a szám, 1196-os értékkel. Ez 13 százalékkal magasabb érték a klasszikus módszerhez képest (2. táblázat). A LiDAR eredményességét a már említett jobb felbontása okozza, jellemzően a kisebb méretű töbörökből detektált többet, mint a másik két adatforrás.

fennsík	terület (km <sup>2</sup> )	töbr. terület (km <sup>2</sup> )	töbör szám (db)					töbör sűrűség (darab/km <sup>2</sup> )		
			digit	krig	%	lidar	%	digit	krig	lidar
Aggteleki	12,31	7,20	113	119	105,3	125	110,6	15,68	16,52	17,35
Szinpetri	12,99	7,73	135	132	97,8	154	114,1	17,46	17,08	19,92
Nagyoldal	8,24	5,17	151	155	102,6	177	117,2	29,23	30,01	34,27
Haragistya	9,98	7,43	152	147	96,7	176	115,8	20,45	19,78	23,68
Ny-Alsó-hegy	7,25	3,88	63	56	88,9	65	103,2	16,25	14,45	16,77
Páska-Bükk	2,46	1,26	26	29	111,5	27	103,8	20,59	22,97	21,39
K-Alsó-hegy	12,40	8,44	311	308	99,0	357	114,8	36,87	36,51	42,32
Teresztenyei	3,68	3,07	33	34	103,0	36	109,1	10,76	11,09	11,74
Jósvafői	3,51	3,08	69	72	104,3	79	114,5	22,37	23,35	25,62
<b>Össz./átl.</b>	<b>72,85</b>	<b>47,26</b>	<b>1053</b>	<b>1052</b>	<b>99,9</b>	<b>1196</b>	<b>113,5</b>	<b>22,28</b>	<b>22,26</b>	<b>25,31</b>

1. táblázat: Részterületek összesített morfológiai adatai. A % értékek a kiindulási értéknek tekintett TOPO állományhoz viszonyított eltéréseket jelzik.

Table 2: Morphometric data by subareas. The % values are calculated by using Topo values as base data.

A töbör sűrűség adatok természetesen követik a töbör számnál látott tendenciákat, hiszen ebből származtatott adatról van szó. Ennek megfelelően az egyes fennsíkok töbör sűrűsége közti eltérések is az iménti magyarázattal értelmezhetők (2. táblázat).

A töbrösödési aránynál már érdekesebb tendenciák láthatók. Hiába azonos a TOPO és a KRIG töbörök darabszáma, utóbbi esetében a fennsíkok átlagos töbrösödési aránya 3,1%-kal alacsonyabb, mint a digitalizált állomány esetében. Ez azért van, mert a KRIG állomány töbrei átlagosan kisebb területűek, amit a töbr-alapterület medián adatsor is alátámaszt. Ez alapvetően arra vezethető vissza, hogy a nagyobb területű töbörök DTM alapján történő lehatárolása során az eredmény sok esetben egy kisebb



kiterjedésű alakzat, vagy gyakran több kisebb forma együttese lesz, amelyek összterülete kisebb, mint a TOPO állományban szereplő kézzel digitalizált töböré.

A fenti állítás részben érvényes a LiDAR-ra is, ám ezt ellensúlyozza, hogy átlagosan több a dolinák száma és átlagos méretük is nagyobb, mint a másik két adatbázis esetében, ezért a LiDAR állomány esetében a töbörösödési arányszám átlagosan kevéssel (3%-kal) nagyobb, mint TOPO esetében (3. táblázat). Két fennsík, a Páska-Bükk és a Teresztenyei esetében látható, hogy a LiDAR értékei elmaradnak a Topo állományétól. A Páska-Bükk esetében ennek oka, hogy a LiDAR-alapú módszer a legnagyobb kiterjedésű formát kisebb területen határolta le, így kis mértékben, de az összesített töbörterület elmarad a Topo állomány hasonló értékétől. A Teresztenyei-fennsík esetében az adathiány az eltérés forrása, mert egy nagyméretű töbör adathiányos terület mentén helyezkedett el, így ezt a LiDAR-alapú módszer nem tudta pontosan lehatárolni.

fennsík	töbörösödési arány (töbrök összterülete/töbrösödő terület)					töbör alapterület medián (m <sup>2</sup> )				
	<i>digit</i>	<i>krig</i>	%	<i>lidar</i>	%	<i>digit</i>	<i>krig</i>	%	<i>lidar</i>	%
<i>Aggteleki</i>	0,17	0,18	106,4	0,17	100,5	6297	6367	101,1	5716	90,8
<i>Szinpetri</i>	0,11	0,12	108,3	0,13	120,5	4392	4779	108,8	4899	111,5
<i>Nagyoldal</i>	0,13	0,14	104,2	0,14	108,3	3317	3586	108,1	2984	90,0
<i>Haragistya</i>	0,10	0,10	92,8	0,12	113,1	2659	2632	99,0	2426	91,2
<i>Ny-Alsó-hegy</i>	0,07	0,05	79,8	0,08	117,5	1864	2192	117,6	2697	144,7
<i>Páska-Bükk</i>	0,30	0,23	78,4	0,29	98,5	6248	3912	62,6	7010	112,2
<i>K-Alsó-hegy</i>	0,15	0,16	106,6	0,17	117,8	2568	2864	111,6	2703	105,3
<i>Teresztenyei</i>	0,14	0,11	83,6	0,12	89,3	6366	5653	88,8	6377	100,0
<i>Jósvafői</i>	0,10	0,11	112,3	0,12	120,6	3104	2654	85,5	3074	99,0
<b>Össz./átl.</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>96,9</b>	<b>0,14</b>	<b>103,5</b>	<b>4091</b>	<b>3849</b>	<b>98,1</b>	<b>4071</b>	<b>103,0</b>

3. táblázat: A töbörösödési arány és a töbör alapterületek mediánértéke. A % értékek a kiindulási értéknek tekintett TOPO állományhoz viszonyított eltéréseket jelzik.

Table 3: doline area ratio and median of the dolines' base-area data compared to the Topo values. The % values are calculated by using Topo values as base data.

A töbörterületek mediánját vizsgálva elmondható, hogy a KRIG töbrök átlagosan hajszálnyival kisebbek a digitalizáltaknál, fennsíkonként vegyes megoszlással, hol kisebb, hol nagyobb értékekkel. A LiDAR állomány töbrei általánosságban nagyon alap-területtel rendelkeznek, mint a Topo adatbázisé. Kivételt képez az Aggteleki-, Nagyoldal- és a Haragistya-

fennsík, ahol a töbrök alapterülete jellemzően kisebb. Mind a három esetben elmondható, hogy az alacsonyabb értékek oka két tendenciában keresendő: egyrészt számos kisterületű töbröt azonosított a LiDAR, ami a Topo adatbázisból hiányzik, másrészt pedig több olyan nagyméretű töbr is található ezeken a fennsíkokon, amelyeket a LiDAR több, kisebb formaként értelmezett.

### **Következtetések**

Összességében megállapítható, hogy sikerült elérnünk a kutatásunk elején kitűzött céljainkat és megalkotni egy viszonylag automatizált töbrlehatárolási módszert, valamint sikerült összevetni több adatforrásból levezetett ugyanazon töbrök morfológiai jellemzőit. Ezek alapján a következő konklúziók vonhatók le:

- Az automatizált töbrlehatárolás digitális terepmodell alapján elvégezhető eredményesen. A nyelőpontok manuális úton történő leválogatása miatt ugyan nem tekinthető teljesen automatizáltnak a módszer, viszont lényegesen gyorsabb és egzaktabb eljárásnak tekinthető, mint a korábbi klasszikus, kézzel történő digitalizálás. Hátránya főleg a nagy területű töbrök nyelőpontjainak szelektálásánál meghatározó, nehéz megállapítani ezen eseteknél a tényleges töbrterületet és a hozzátartozó nyelőpontokat. Nagy előnye, hogy a valós domborzat alapján történik a lehatárolás, ennek pontosságát a DTM terepi felbontása határozza meg, a legjobb a LiDAR alapú terepmodell használata, ha van rá lehetőség.
- A kétféle DTM alapján előállított, majd a klasszikus módszerrel készült adatbázis töbreivel való morfológiai összehasonlítás alapján elmondható, hogy a régóta használt, digitalizáláson alapuló módszer megfelelő eljárásnak tekinthető visszamenőleg is és a jövőre nézve is, ha nem áll rendelkezésünkre más adatforrás, mint a megfelelő méretarányú topográfiai térkép. Ezt támasztja alá, hogy markáns, kiugró eltérések nem voltak tapasztalhatók a DTM adatbázisok töbr-morfológiai mutatóihoz képest.
- A DTM alapú lehatárolás azonban jóval pontosabb eredményt hozhat a töbr pontosabb területének és a perem vonalvezetésének meghatározása terén és ebből fakadóan minden ezekből származtatott morfológiai mutató esetében.
- A DTM-k segítségével gyorsan és egyszerűen lehatárolhatóvá válik azon területek kiterjedése, ahol potenciális töbrsődés mehet végbe, ebben az

esetben a 10°-nál kisebb lejtésű területek, ezzel alapot adva a területei alapú elemzéseknek.

- A LiDAR, mint a jelenleg legmodernebb DTM alkotási eszköz bizonyította, hogy a töbör-morfometria területén is a lehető leghasznosabb és legpontosabb eszköznek tekinthető, hátránya, hogy előállítása jelenleg még igen költséges.
- A LiDAR alapú töbör-morfometria különösen azokon a területeken javasolt, ahol a kisméretű formák magas arányban szerepelnek, melyek a topográfiai térképen nem kellő részletességgel szerepelnek.

Jövőbeli céljaink között szerepel, hogy egy kisebb területre a LiDAR DTM alapján készült töbör-adatbázist összevessük egy kvadrokopterrel szerelt nagyfelbontású kamera adatai alapján készült DTM-ből levezetett töbör adatsorral, szintén morfometriai mutatók alapján, ezáltal a jelenlegi két legmodernebb eszközt összehasonlítva, amelyek hasonló felbontású DTM-k előállítására képesek.

### **Köszönetnyilvánítás**

A kutatást az OTKA 104811 számú pályázata és az MTA Bolyai Ösztöndíj (TT) támogatta. Továbbá köszönjük az Aggteleki Nemzeti Parknak, hogy lehetővé tette számunkra a LiDAR adatok kutatási célú felhasználását.

### **Irodalom**

*BÁRÁNY-KEVEI I. – MEZŐSI G.* (1993): New morphometrical parameters for explanation of karst development. – Acta Geogr. Szegediensis 31. pp. 27-33.

*DUTKÓ A.* (2000): A Bükk dolináinak statisztikai elemzése. – Szakdolgozat, ELTE TTK, kézirat.

*FARSANG A. – M. TÓTH T.* (1993): Morphometric investigation of dolines in Bükk Mountains. – Acta Geogr. Szegediensis 31. pp. 53-60.

*FORD, D. C. – WILLIAMS, O. W.* (1989): Karst Geomorphology and Hidrology. – London, Unwin Hyman, 560 p.

*KEMMERLY, P. R.* (1986): Exploring a contagion model for karst-terrine evolution. – Geol. Soc. of Am. Bull. 97. pp. 619-625.

*KOBAL M. – BERTONCELJI. – PIROTTI F. – KUTNAR L.* (2014): LiDAR processing for defining sinkhole characteristics under dense forest cover: a case study in the Dinaric Mountains. - The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,

- Volume XL-7, 2014 ISPRS Technical Commission VII Symposium, 29 September – 2 October 2014, Istanbul, Turkey.
- MARI L.* (2003): Felszínborítás-változás vizsgálata térinformatikai módszerekkel az Aggteleki Nemzeti Park területén. – Karsztfelődés VIII., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, p. 231-242.
- MEZŐSI G.* (1984): A Sajó-Bódva köze felszínfejlődése. – Földr. Ért. 33.3. pp. 181-205.
- MILLS, H. H. – STARNES, D. D.* (1983): Sinkhole morphometry in a fluviokarst region: eastern Highland Rim, Tennessee, USA – Zeitschr. Geomorph. 27.1. pp. 39-54.
- MONTANA J. M.* (2002): Geophysical Analysis of a Central Florida Karst Terrain using Light Detection and Ranging (LIDAR) and Ground Penetrating Radar (GPR) Derived Surfaces – Florida International University, Geology Department, diplomamunka.
- PÉNTEK K. – VERESS M. – SZUNYOGH G.* (2000): Karsztos formák matematikai leírása függvényekkel. – Hidr. Közl. 80. 4, pp. 197-205.
- STRAHLER, A.N.* (1964): Quantative geomorphology of drainage basins and channel networks – in: Te Chow, V. (szerk.): Hand Book of Applied Hydrology, McGraw Hill Book Company, New York.
- TELBISZ T.* (2001): Új megközelítések a töbör-morfológiában az Aggteleki-karszt példáján – Földrajzi Közlemények, 125 (49) / 1-2, p. 95-108.
- TELBISZ T.* (2003): Karsztos felszínfejlődés és beszivárgás matematikai modellezése. – PhD-értekezés, ELTE, Bp, kézirat.
- TELBISZ T.* (2004): Karsztos felszínformák vizsgálata digitális domborzatmodellek segítségével. – I. HUNDEM Konferencia, Miskolc.
- TELBISZ T.- MÓGA J.* (2005): Töbör-morfometriai elemzések a Szilicei-fennsík középső részén – Karsztfelődés X., Szombathely, p. 245-266.
- TELBISZ T.- MÓGA, J.- KÓSIK SZ.* (2006): Töbör-morfometriai elemzések a Szilicei-fennsík délnyugati részén – Karsztfelődés XI., Szombathely, p. 133-152.
- TELBISZ T. - ÁDÁM E.* (2011): Milyen lehetett a Gömör–Tornai-karszt nagyléptékű domborzata a negyedidőszak elején? – in: *CSAPÓ T., KOCSIS ZS., PUSKÁS J., TÓTH G., ZENTAI Z.* (szerk.): A Bakonytól Madagaszkárig, tanulmánykötet a 65 éves Veress Márton tiszteletére, Szombathely, 2011, pp.25-34.
- TELBISZ T. - SZÉKELY B. - TIMÁR G.* (2013): Digitális terepmodellek (Adat, látvány, elemzés) – ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Természetföldrajzi Tanszék, Budapest, 80 p.
- VINCENT, P. J.* (1987): Spatial dispersion of polygonal karst sinks. – Zeitschr. Geomorph. 31.1. pp. 65-72.

- WHITE, W. B.* (1988): *Geomorphology and Hidrology of Karst Terrains.* – Oxford University Press, 464 p.
- WILLIAMS, P. W.* (1971): Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea. – *Zeitschr. Geomorph.* 15.1. pp. 40-61.
- ZBORAY Z. – KEVEINÉ BÁRÁNY I.* (2004): Domborzatértékelés a Bükk-fennsíkon légifelvételek felhasználásával. – *Karsztfejlődés IX.*, BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, p. 207-213.