

**LIDAR- ÉS TOPOGRÁFIAI TÉRKÉP ALAPÚ DIGITÁLIS TEREP-
MODELLEKBŐL LEVEZETETT, ILLETVE KÉZZEL DIGITALI-
ZÁLT TÖBÖR-KÖRVONALAK MORFOMETRIAI ÖSSZEHASON-
LÍTÁSA AZ AGGTELEKI-KARSZT PÉLDÁJÁN**

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

LÁTOS TAMÁS¹–TELBI SZ TAMÁS¹–
DEÁK MÁRTON¹–SZÉKELY BALÁZS^{2,3}– KOMA ZSÓFIA²–
STANDOVÁR TIBOR⁴

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

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

³ Interdisziplináres Ökologisches Zentrum, TU Bergakademie Freiberg,
Leipziger str. 29, D-09596 Freiberg, NSZK

⁴ ELTE Növényrendszertani, Ökológiai és Elméleti Biológiai Tanszék, 1117
Budapest, Pázmány P. sétány 1/C.

latostamas@gmail.com

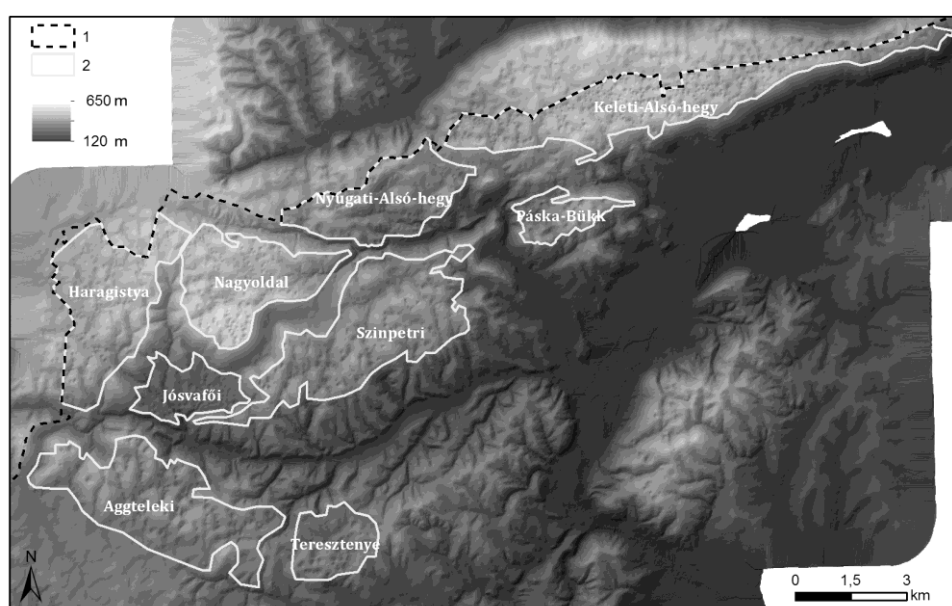
Abstract: An advantageous consequence of the rapid evolution of topographic data acquisition techniques is the possibility to measure the topography with increasingly higher accuracy. New remote sensing techniques and data processing methods allow detecting microtopographic features of karst phenomena with unprecedented precision. In this study, our aim was to compare doline morphometric data derived from various types of digital terrain models (DTMs). The study area is the Aggtelek Karst. An automated method of DTM-based doline recognition is presented here; the results of this processing technique are compared to that of the topographic map-based classic outlining method. We compared the three doline database by using geomorphometric tools. Our conclusion is, that even the classic method provides reliable results, however the DTM-based method with LiDAR data is somewhat more accurate in detecting and analyzing small-scale 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 a töbrök-morfometriai kutatások alapjait. Az alapvető morfometriai paraméte-

rek meghatározhatók a bőséges szakirodalom alapján (*MILLS – STARNES* 1983, *BÁRÁNY KEVEI – MEZŐSI* 1991, *KEMMERLY* 1986, *VINCENT* 1987, *WHITE* 1988, *FORD – WILLIAMS* 1989, *BÁRÁNY-KEVEI – MEZŐSI* 1993, *FARSANG – M. TÓTH* 1993, *PÉNTEK* et al. 2000, *DUTKÓ* 2000 stb.). Ezek közül mi a következőket használtuk:

- egyedi morfológiai jellemzők: terület, kerület, mélység, kerekítettség, kompaktság, vízszintes megnyúltság, mélység-átmérő arány, hossztengety azimutja.
- területi jellemzők: töborszám, töborsűrűség, töbrosódési arány.



1. ábra: Az Aggteleki-karszt vizsgált fennsíkjai
 Jelmagyarázat: 1. államhatár, 2. fennsíkok
 Fig. 1: The studied plateaus of Aggtelek Karst
 Legend: 1. state border, 2. plateaus.

Vizsgálati területünk a Gömör–Tornai-karszt Magyarországra eső része volt, a Szalonnai-karszt kivételével, mivel ez utóbbiról nem állt rendelkezésünkre LiDAR adat (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, 2004, *ZBORAY – KEVEINÉ BÁRÁNY* 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, *CARVALHO* et al. 2013, *GOSTINČAR* 2013, *PARDO-IGÚZQUIZA* et al. 2013, *KOBAL* et al. 2014). A klasszikus töbörlehatárolási módszer szerint megfelelő méretarányú topográfiai térképről a legkülső zárt szintvonal digitalizálásával előállítható egy adott terület töbör-adatbázisa. Ezzel a módszerrel azonban több probléma is adódhat:

- a térkép generalizáltsága miatt a morфомetriai 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 töbör peremét.

A töbör 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 morфомetriai jellemzőit. A kutatás tehát a következő kérdésekre keresi a választ:

- milyen egyezések/különbségek mutathatók ki ugyanazon töbrök morфомetriai paramétereinek összevetése során három különböző eljárással meghatározva a töbröket?
- lehetséges-e a töbrök automatizált lehatárolása digitális domborzatmodell alapján?
- használható-e a LiDAR-alapú DTM töbörlehatárolásra és morфомetriai elemzésre?

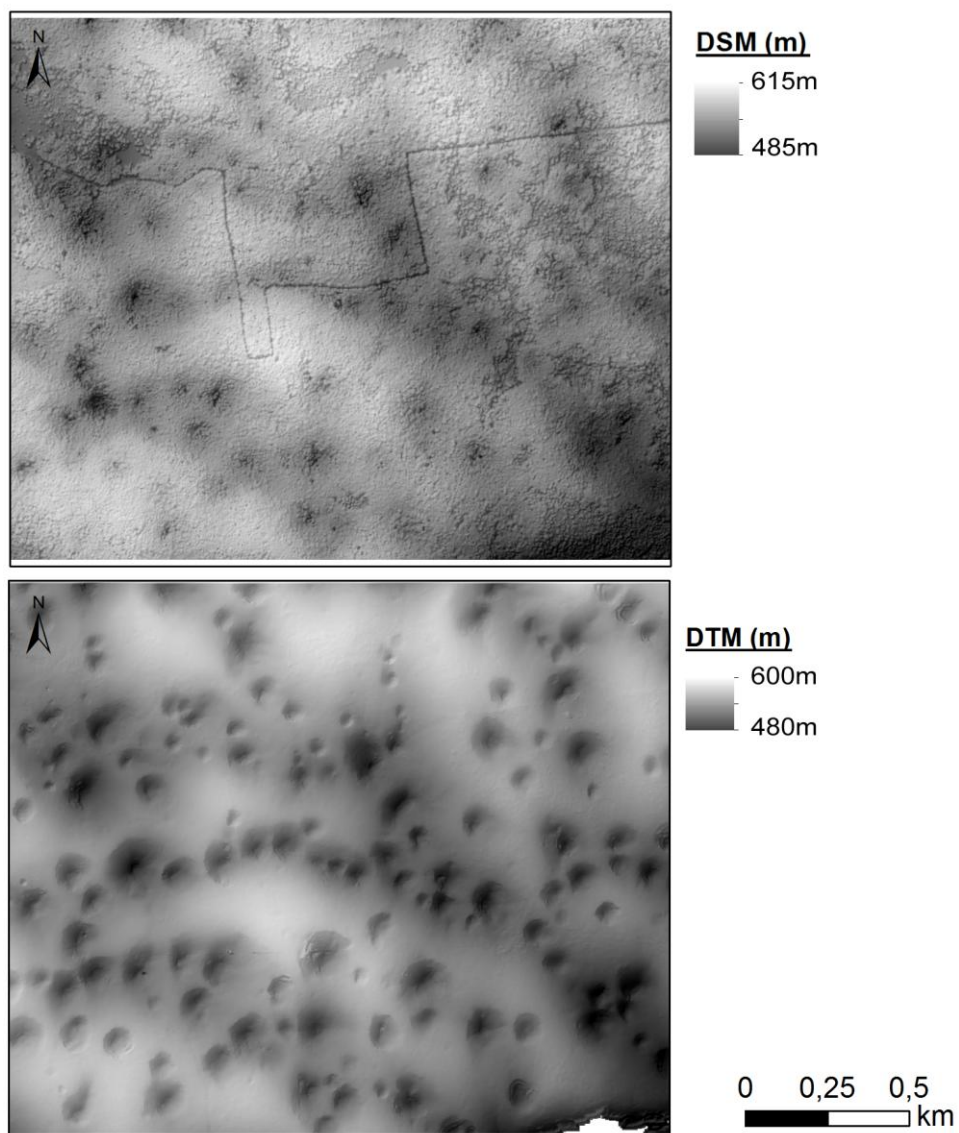
Adat és módszer

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

1. Klasszikus módszerrel meghatározott töbrök (a továbbiakban erre a „TOPO” rövidítéssel hivatkozunk): 1:10 000 méretarányú topográfiai térkép alapján, a legkülső zárt szintvonal digitalizálásával kijelölt töbrök. Ebben az esetben a töbörperem és a töbör aljának magassági értékét is a térkép alapján határoztuk meg.

2. Kriging interpolációval létrehozott DTM-ből levezetett töbrök (továbbiakban: „KRIG”): ezt szintén az 1:10 000 méretarányú topográfiai térkép alapján kaptuk meg. A szintvonalak és a magassági pontok digitalizálásával, majd kriging interpolációval előállított, 10 m horizontális felbontású digitá-

lis 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).



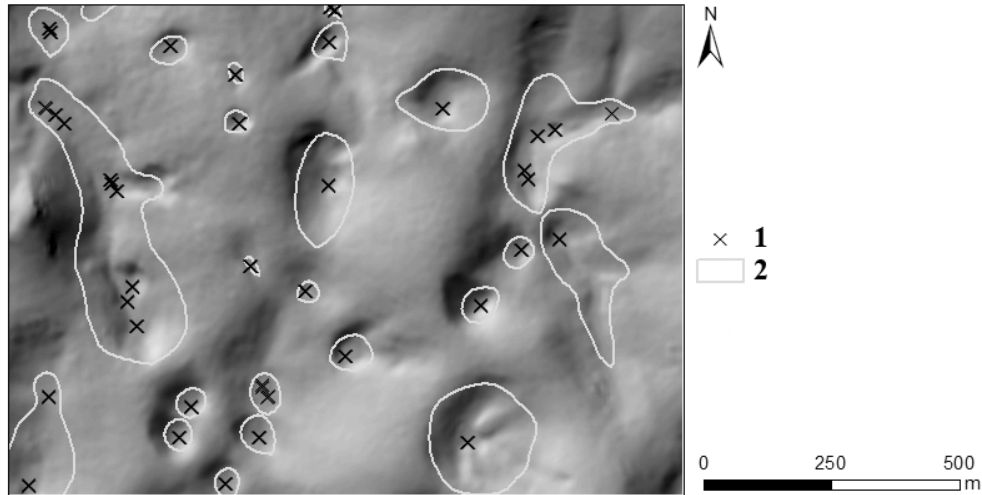
2. ábra: A LiDAR mérésből létrehozott DSM és DTM között jól látszik a növényborítás okozta különbség. Kivágat az Alsó-hegy egy részéről. A DSM-en az országhatár vonala is jól megfigyelhető.
 Fig. 2: Difference between the LiDAR DSM and the LiDAR DTM at the northern area of the Alsó-hegy. Note that the state border appears on the DSM.

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 (MANDLBURGER et al. 2009, OTEPKA et al. 2012, PFEIFER et al. 2014). Az így előállított digitális felszínmodell (DSM) 1 m/px terepi felbontású volt. Ebből a talajpontok leválogatásával és interpolációjával 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. Ez jellemzően a meredek oldallejtőkön a fennsíkok peremén, illetve a völgyoldalakon fordult elő, így a töbröket alapvetően nem érintette. Ezen hibák javítására először egy 5 pixel, majd egy 15 pixel méretű mediánszűrőt alkalmaztunk. Mivel a LiDAR adatgyűjtés 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.

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

- Simító szűrő (*Mean*) alkalmazása 5 px-s ablakmérettel. Ezt csak a LiDAR DTM esetében alkalmaztuk, az apró egyenetlenségek simítására, melyek később hibát okozhatnának. A KRIG DTM esetében erre nem volt szükség.
- Lefolyási irányok meghatározása (*Flow direction*). Ez a következő műveletek egyik bemenő adata.
- A területre eső töbrök nyelőpontjainak meghatározása (*Sink*). Az eszköz működési elve az, 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 azonban nemcsak a töbrök legmélyebb pontjait jelöli ki, hiszen a fenti pixel-szomszédságon alapuló állítás más természeti formákra is igaz lehet, továbbá a DTM előállításánál generált hibák is előidézhettek nem valós nyelőpontokat. A valós töbrö-nyelőpontok leválogatását egyelőre nem sikerült automatizálni, így ehhez manuális szerkesztésre van szükség. Ehhez a árnyékolt domborzati képet, valamint a DTM-ből generált szintvonalakat használtuk alapként, mivel ezek együttes alkalmazásával egyértelműen eldönthető, hogy töbröhöz tartozik-e az adott nyelőpont. Mivel egy nagyobb kiterjedésű (uvala jellegű) töbrö esetén nem ritka, hogy több nyelőponttal is rendelkezik, ezért szükséges az egy töbröhöz tartozó több nyelőpont azonos egyedi azonosítószámmal való ellátása, mivel a víz-

gyűjtő lehatárolásának alapja ez az azonosítószám lesz a későbbiekben (3. ábra).



3. ábra: Egy töbörhöz esetenként több nyelőpontot is hozzárendel az eljárás
Jelmagyarázat: 1. nyelőpontok, 2. töbrök
Fig.3: Multiple sinkholes have been assigned to certain dolines using the “Sink” tool
Legend: 1. sinkhole, 2. doline outline.

- A korrigált nyelőpont-adatbázis segítségével meghatározzuk a pontokhoz tartozó vízgyűjtő területeket (*Watershed*).
- Ezután a vízgyűjtő területekhez egységesen hozzárendeljük a határuk legalacsonyabb pontjának magassági értékét, megkapva ezzel a töbörperem 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 töbör 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 töböradatbázisokból. 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 megfelel-

tethető módon. Ennek oka számos esetben az volt, hogy valamelyik eljárás ugyanazt a formát több töbröként értelmezte, míg a másik összevontan csak egyként. Illetve a vizsgált terület peremén akadtak olyan formák, amelyek hiányoztak valamelyik adatbázisból. Így végül 947 darab egymásnak megfelelő töbr morfológiai adatait hasonlítottuk össze.

Az elemzések másik módszere a területi alapú vizsgálatokat jelentette, mellyel a különféle módon nyert adatok töbr-sűrűségi és töbrösödési aránybeli különbségeit kívántuk megragadni. Ehhez az elemzéshez szükség volt a fennsíkok lehatárolására. Ezt elsősorban a lejtőszög-térkép alapján végeztük el, de ahol a fennsíkhöz közel egy völgyi töbrsor helyezkedett el, ott ezeket a völgyeket is hozzácsatoltuk az adott fennsíkhöz. Ezt követően csak a lehatárolt elemzési területekre eső töbrökkel számoltunk, de ez esetben nem volt fontos, hogy az egyes töbrök egyesével megfeleltethetők legyenek egymásnak, sőt éppen arra voltunk kíváncsiak, hogy mennyivel több formát azonosít egyik vagy másik eljárás. Így a három adatbázis értelemszerűen különböző számú elemmel rendelkezik az egyes részterületekre vonatkozóan.

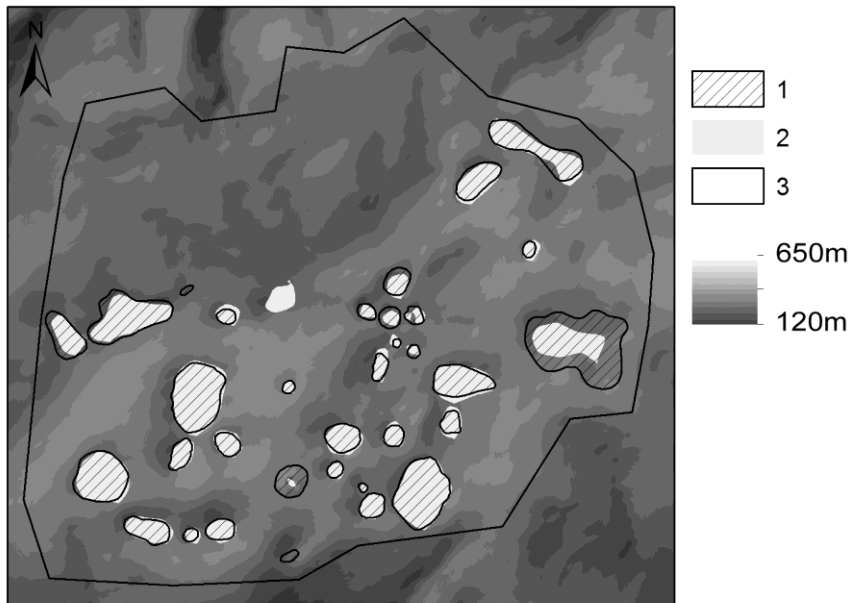
A területi elemzésekhez szükség volt a lehatárolt egységeken belül a „töbrösödésre alkalmas területek” leválogatására. Ismert tény, hogy a meredek térszíneken nem alakulnak ki töbrök, hiába alkalmas rá az alapkőzet. Így, ha a meredek térszíneket hozzászámoljuk a vizsgált egységek területéhez, akkor a sűrűség, illetve töbrösödési arányszám-értékek nem helyesen jellemzik a felszínt. A térszín meredekségének jellemzéséhez készítettünk egy simított domborzatmodellt 9 pixeles átlag szűrővel a krigelt DTM alapján, ami így a kisméretű, de meredek formákat nem tartalmazza, hanem valóban a térszín általános lejtőszögét tudjuk ez alapján meghatározni. Ezt követően hisztogramot készítettünk a töbrök nyelőpontjainak általános lejtőszög-értékeiből és ezt kaptuk, hogy a töbrök 96%-a a 10°-nál kisebb lejtésű térszíneken helyezkedik el, így a továbbiakban a fennsíkok „töbrösödésre alkalmas területének” a 10°-nál kisebb általános lejtésű térszíneket tekintettük, és erre határoztuk meg a sűrűségi, illetve töbrösödési arányszám-értékeket.

Eredmények

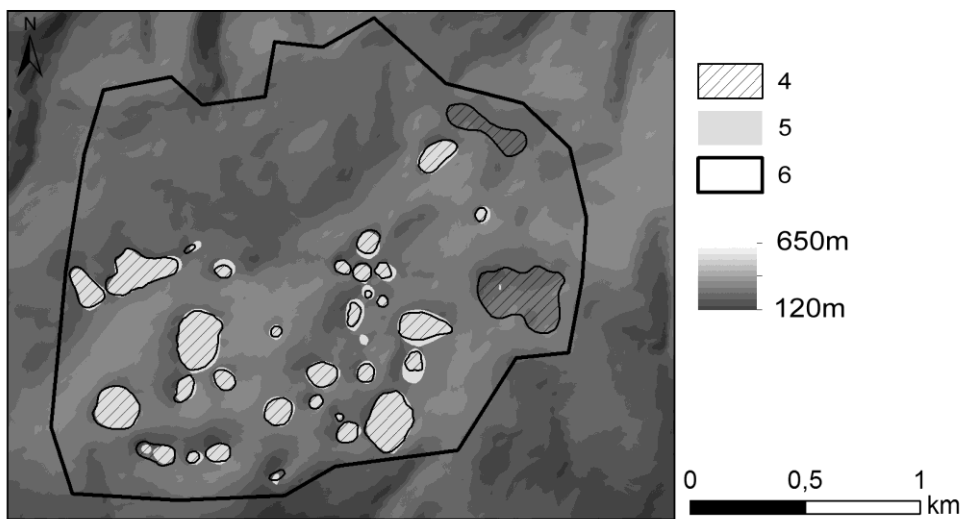
Térképi összehasonlítás

Már pusztán a három adatforrásból levezetett töbrök közös térképen való ábrázolása révén is mód nyílik bizonyos következtetések levonására az alapadatokat és a módszereket illetően.

Krig. DTM



LiDAR DTM



4. ábra: LiDAR és krigelt DTM-ből levezetett, és a topográfiai térkép alapján megrajzolt töbrök közti különbségek
 Jelmagyarázat: 1,4. TOPO töbrök, 2. KRIG töbrök, 3,6. Terezstenye-fennsík, 5. LiDAR töbrök

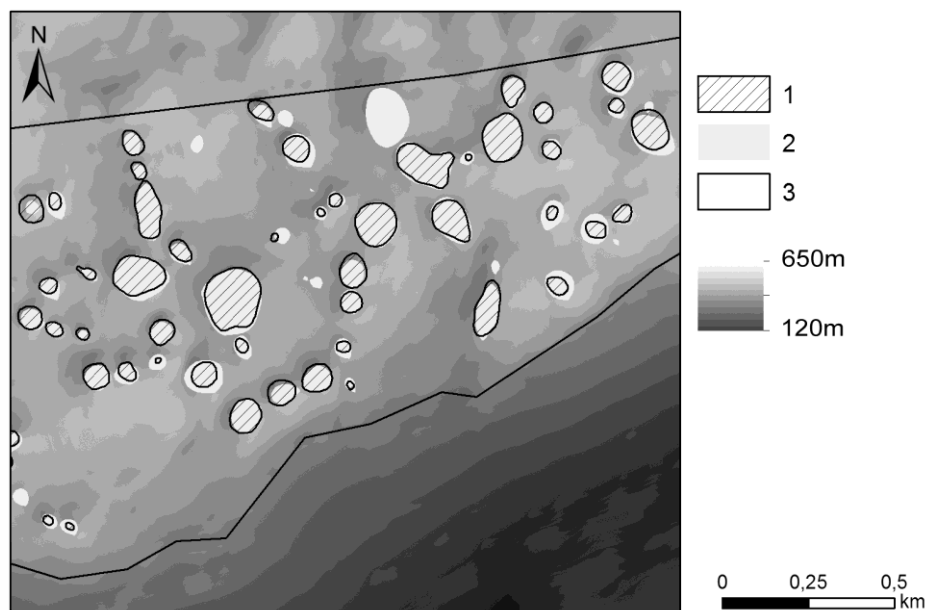
Fig. 4: Differences between the dolines of the TOPO, KRIG and LiDAR database

Legend: 1,4. dolines of TOPO method, 2. dolines of KRIG DTM, 3,6. Terezstenye plateau, 5. dolines of LiDAR DTM.

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 ezeken a helyeken számunkra használhatatlan volt. A szakadások (adathiány) mentén így a töbrök kimutatása nem volt lehetséges. Általánosságban elmondható, hogy a LiDAR-alapú 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 (pl. 4. ábra). Ezekben az esetekben jellemzően a nyelőpont detektálása volt a probléma, ami adódhat a LiDAR DTM során alkalmazott osztályozás és interpoláció hibájából.

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 2,5 m/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).



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

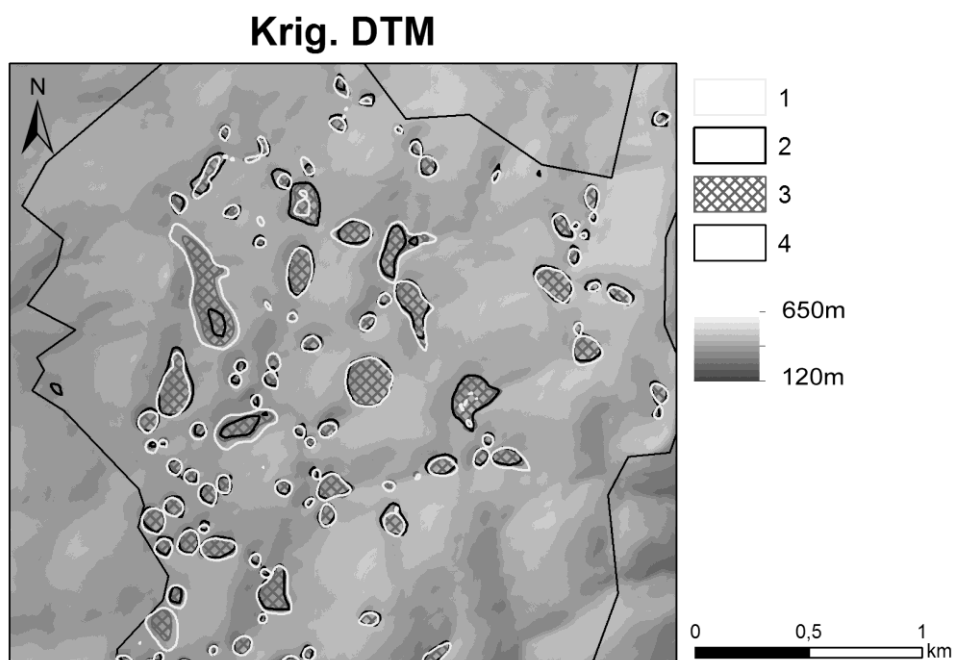
Jelmagyarázat: 1. LiDAR töbrök, 2. KRIG töbrök, 3. Keleti-Alsó-hegy

Fig. 5: The LiDAR database resulted several smaller dolines, which are missing from the KRIG database

Legend: 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 töbrő 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. Szerepet játszhat továbbá a domborzatmodellek előállításánál alkalmazott interpolációs eljárás. Legfontosabb tényező azonban az automatizált eljárás egyetlen manuális lépése lehet, amelyben a nyelőpontok törlése és összevonása történik.



36. ábra: Számos példa látható a három alapadatból levezetett töbrök közti eltérésekre
Jelmagyarázat: 1. LiDAR töbrök, 2. KRIG töbrök, 3. TOPO töbrök, 4. Haragistya-fennsík.

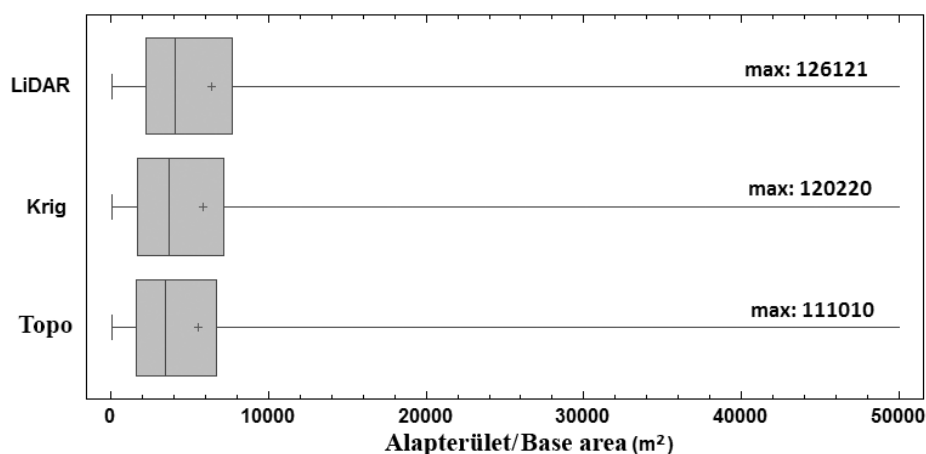
Fig. 6: Differences between the three doline databases

Legend: 1. dolines of LiDAR DTM, 2. dolines of KRIG DTM, 3. dolines of TOPO database, 4. Haragistya plateau.

Közös töbrök morfológiai jellemzőinek statisztikai összehasonlítása

A három különböző eljárással előállított töbrő-adatbázis összevetésében a következő módszer a morfológiai mutatók statisztikai összehasonlítása volt. A mindhárom adatbázisban szereplő töbrök száma 947 volt, ezek sta-

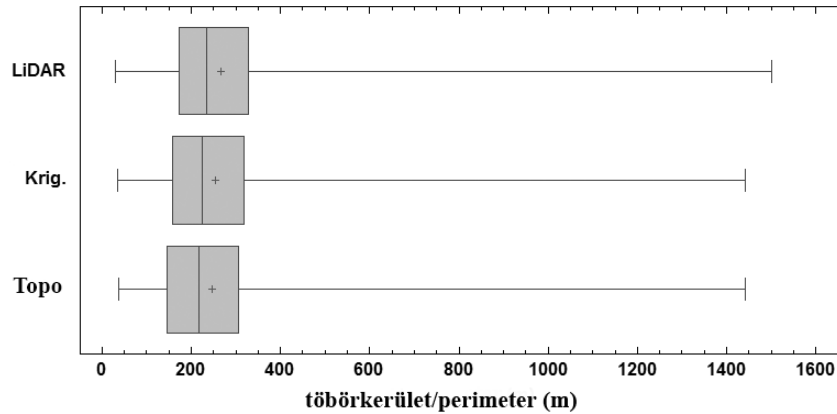
tisztikai eloszlásait hasonlítottuk össze ún. box-whisker (doboz-bajusz) diagramok segítségével (a doboz az interkvartilis tartományt jelöli, a + jel az átlagot, a függőleges vonal a mediánt).



7. ábra: Töbör-alapterületek eloszlása a három adatbázis alapján.
Fig. 7: Distribution of doline areas of the three databases.

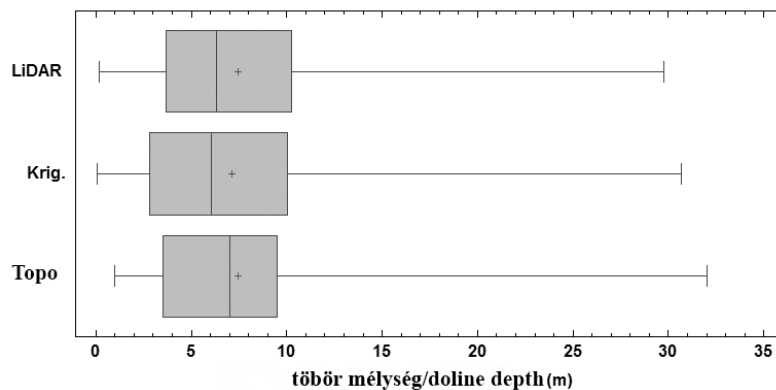
- Töbör-alapterület: a töbör-alapterületek eloszlása alapvetően lognormális, amint azt számos korábbi vizsgálat is kimutatta már (pl. TELBISZ 2001, 2003). A három adatbázis értékeinek mediánja és átlaga hasonló nagyságrendbe esik, ám a LiDAR adatok valamivel nagyobb értéket mutatnak a másik kettőnél. 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 területek az egymásnak megfeleltethető töbrök 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. Ez utóbbi megjegyzés ellenére a TOPO és a KRIG módszerrel kapott töbör-alapterületek átlagai között igen kicsi az eltérés (7. ábra).

- 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).

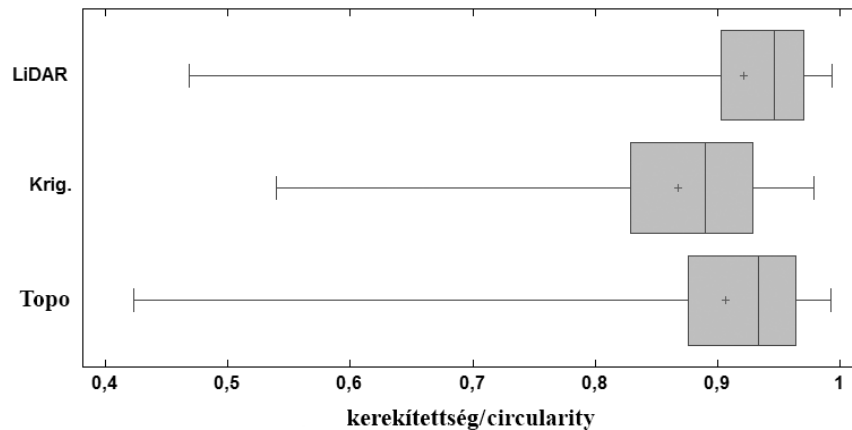


8. ábra: Töbörkerületek eloszlása a három adatbázis alapján.
 Fig. 8: Distribution of doline perimeters of the three databases.

• **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 magasságértéke csak a szintvonalakhoz igazodva, ezért pontatlanabbul olvasható le a térképről. Ebben az esetben különösen érvényesül a DTM-k előnye a morfológiai elemzés során, hiszen ezek jóval pontosabb értéket eredményeznek. A LiDAR esetében elmondható, hogy a valóságot igen jól közelítő értékeket szolgáltatnak. A LiDAR és a KRIG közti eltérést ebben az esetben részben a felbontásbeli különbség, részben az eltérő alapadat okozza, ennek ellenére lényegi differencia nem látható az értékek között (9. ábra).

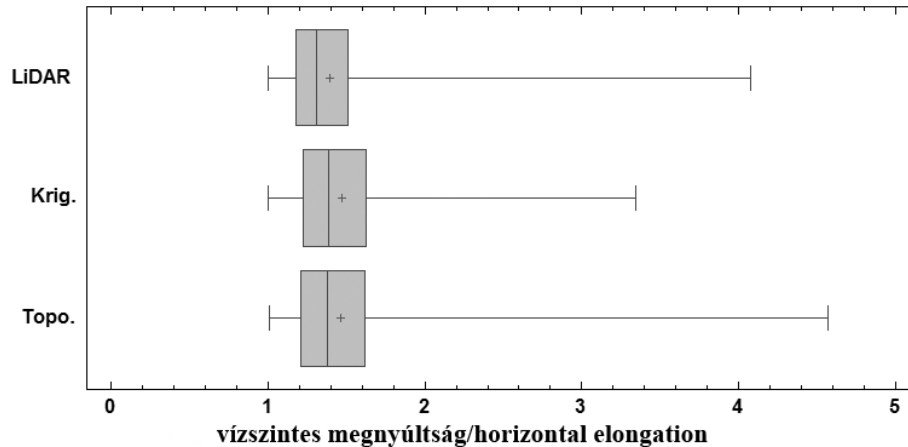


9. ábra: A töbörmélység esetében jelentősebb eltérés, ami megmutatja a DTM-ek előnyét.
 Fig. 9: There are distinguishable differences in the distribution of doline depth data, indicating the advantages of using DTMs.

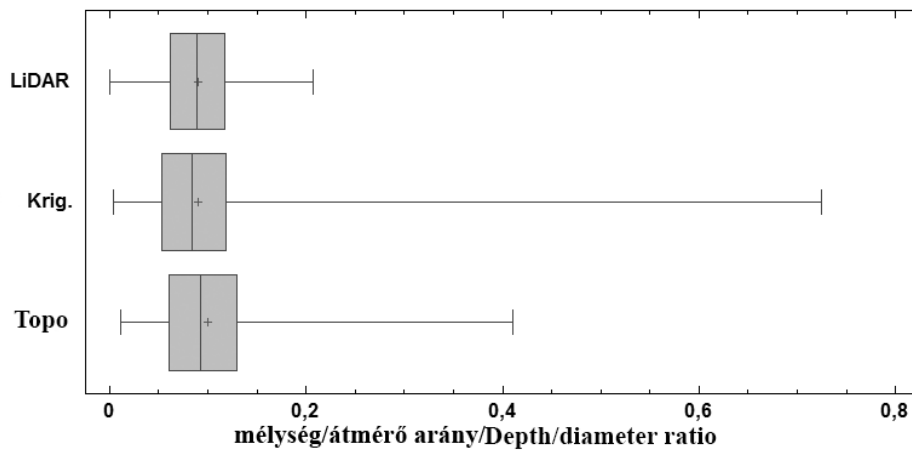


10. ábra: A kerekítettség értékek eloszlása mutatja a legnagyobb eltérést.
 Fig. 10: The largest differences appear in circularity distributions.

- Kerekítettség(= $(4\pi \cdot \text{Terület}) / \text{Kerület}^2$): ez a mutató részben a formák megnyúltságát, részben a körvonal cikkcakkosságát 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. Ugyanakkor a LiDAR és a KRIG közti jelentős különbség nehezen magyarázható. Talán a LiDAR jobb felbontása lehet a válasz: e szerint a töbrök alakja ténylegesen nagyon közel áll a körhöz, és ez pontosabban jelenik meg a jobb felbontású LiDAR-ban, mint a KRIG esetén.
- 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 töbrök alakja a legpontosabbnak tekinthető LiDAR szerint átlagosan igen közel áll a körhöz (11. ábra).
- A mélység-átmérő arány esetében a mélység adatok eloszlásánál tett megállapítások az érvényesek, ebből fakadóan a LiDAR és a KRIG adatok átlaga és mediánja közel egyező, míg a TOPO állomány mélység/átmérő értékei valamivel magasabbak (12. ábra).



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

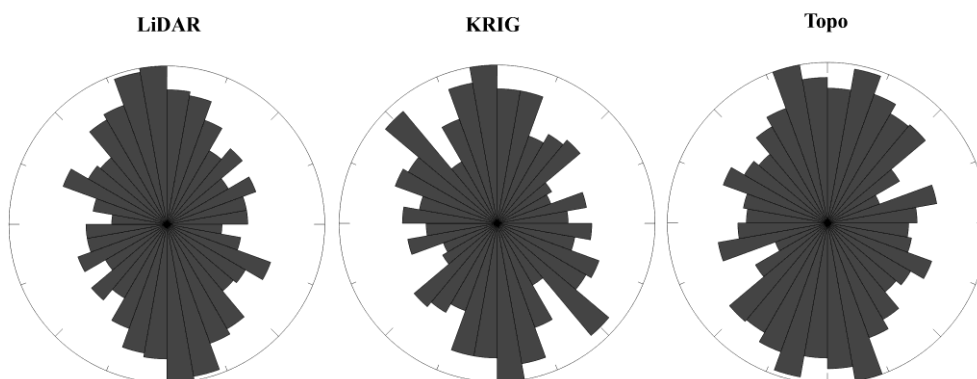


12. ábra: A mélység/átmérő arány értékei elsősorban a maximum értékekben térnek el egymástól.
 Fig 12: The values of the depth/diameter ratio show differences mainly in the maximum values.

• 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 KRIG adatsorán látható még egy kevésbé markáns ÉNy–DK-i irányultság, ami a másik két adatbázisnál nem érzékelhető (13. ábra).

Emellett az egyes adatbázisok egymásnak megfeleltethető töbrei alapján számított azimuteltérések eloszlásából megállapítható, hogy a legkisebb eltérés a két DTM-alapú állomány töbrőértékei között mutatkozik, míg a TOPO-állomány értékeivel összevetve őket közel azonos azimuteltérést mutatnak. Ily módon a kétféle DTM egymást igazolja, és az ezekből számi-

tott hossz tengely némileg pontosabb adatnak tekinthető, mint a TOPO állomány alapján meghatározott (I. táblázat).



543. 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.

I. táblázat
 Table I.

A két DTM állományt egymással összevetve a legkisebb eltérés az egyes töbrök hossz tengelyeinek azimutértékei között mutatkozik; míg a TOPO állomány töbreihez képest mind a KRIG, mind a LiDAR hasonló eltérést mutat. Comparing the values of the LiDAR and KRIG databases the least differences in the doline azimuths appear. Both DTM databases show similar differences compared to the TOPO database values.

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

Területi jellemzők összehasonlítása az összes lehatárolt töbör alapján

A részterületek összesített értékeit vizsgálva, a töbör számokat tekintve elmondható, hogy a klasszikus módszer és a krigelt DTM-ből levezetett töbrök 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, mint a klasszikus módszer segítségével számított (II. táblázat). A LiDAR-alapú módszer eredményességét a már említett jobb felbontása okozza, jellemzően a kisebb méretű töbrökből detektált többet, mint a másik két eljárás.

II. táblázat
Table II.

Részterületek összesített morfolometriai adatai. A % értékek a kiindulási értéknek tekintett TOPO állományhoz viszonyított eltéréseket jelzik.

Morphometric data by subareas. The % values are calculated by using TOPO values as reference data.

fennsík	terület (km ²)	töbr. terület (km ²)	töbrőszám (db)					töbrősűrűség (darab/km ²)		
			TOPO	KRIG	%	LiDAR	%	TOPO	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
Össz./átl.	72,85	47,26	1053	1052	99,9	1196	113,5	22,28	22,26	25,31

A töbrősűrűség-adatok természetesen követik a töbrőszámnál látott tendenciákat, hiszen a sűrűséget a darabszámból számítjuk. Ennek megfelelően az egyes fennsíkok töbrősűrűsége közti eltérések is az előző magyarázattal értelmezhetők (II. táblázat).

A töbrősődési aránynál már érdekesebb tendenciák láthatók. Hiába azonos a TOPO és a KRIG töbrök darabszáma, utóbbi esetében a fennsíkok átlagos töbrősődési 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 adatsora is alátámaszt. Ez alapvetően arra vezethető vissza, hogy a nagyobb területű töbrök DTM alapján történő lehatárolása során az eredmény gyakran több kisebb forma együttese lesz, amelyek összterülete kisebb, mint a TOPO állományban szereplő, kézzel digitalizált töbröké. Ez jellemzően szintén az automatikus eljárás egyetlen manuális lépésre vezethető vissza.

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 töbrősődési arányszám átlagosan kevéssel (3%-kal) nagyobb, mint a TOPO esetében (III. táblázat). Két fennsík, a Páska-Bükk és a Teresztenyei-fennsík 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.

III. táblázat

Table III.

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

Doline area ratio and median of the doline base-area data compared to the TOPO values. The % values are calculated by using TOPO values as reference data.

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

A töbörterületek mediánját vizsgálva elmondható, hogy a KRIG töbrök átlagosan hajszálnyival kisebbek a digitalizáltaknál, fennsíkonként egyes megoszlással, hol kisebb, hol nagyobb értékekkel. A LiDAR állomány töbrei általánosságban nagyobb alapterülettel rendelkeznek, mint a TOPO adatbázis dolinái. Kivételt képez az Aggteleki-, a Haragistya-fennsík és Nagyoldal, 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 töbör 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 nagyrészt automatizált töbörlehatárolási módszert, valamint sikerült összevetni a többféle eljárással levezetett, de egymásnak megfeleltethető töbörk morфомetriai jellemzőit. Ezek alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- Az automatizált töbörlehatárolás digitális terepmodell alapján elvégezhető eredményesen. A nyelőpontok manuális úton történő leválogatása miatt ugyan nem tekinthető teljesen automatizáltnak a módszer, viszont lényegesen gyorsabb (feltéve, hogy a DTM már rendelkezésre áll) és némileg egzaktabb eljárásnak tekinthető, mint a korábbi klasszikus, kézzel történő digitalizálás. A DTM-alapú automatizált eljárás hátránya elsősorban a nagy területű töbörk nyelőpontjainak manuális szelektálásában keresendő. A nagy területű mélyedések esetén sokszor nehéz megállapítani, hogy mely nyelőpontok tartoznak össze, ami jelentősen befolyásolhatja a töbörszámot és töbörterületet is. Így további kutatásaink egyik fókusza, hogy miként lehet ezt a manuális lépést is objektív, automatikus megközelítéssel kiküszöbölni.
- A lehatárolás pontosságát a DTM terepi felbontása határozza meg, a legjobb a LiDAR alapú terepmodell használata, ha van rá lehetőség.
- A kétféle DTM alapján előállított, illetve a klasszikus módszerrel készült adatbázis többreinek morфомetriai összehasonlítása alapján elmondható, hogy a régóta használt, topográfiai térkép digitalizálásán 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 eltéréseket nem tapasztaltunk a DTM adatbázisok töbör-morфомetriai mutatóihoz képest.
- A DTM-alapú lehatárolás azonban jóval pontosabb eredményt hozhat a perem vonalvezetésének meghatározása terén és ebből fakadóan minden ebből származtatott morфомetriai mutató esetében.
- A DTM-ek segítségével gyorsan és egyszerűen lehatárolhatóvá válik a töbörösödésre alkalmas területek kiterjedése. Jelen esetben a 10° -nál kisebb lejtésű területeken alakult ki a töbörök 96%-a, így ez a küszöbérték jól használható a töbörösödésre alkalmas területek lehatárolására.
- A LiDAR mint a jelenleg legmodernebb DTM-alkotási eszköz, a töbör-morфомetria területén is a lehető legpontosabb eszköznek tekinthető. Hátránya, hogy előállítása jelenleg még igen költséges.

- A LiDAR alapú töbör-morfometria különösen azokon a területeken javasolt, ahol a kisméretű formák, melyeket a topográfiai térkép nem kellő részletességgel tükröz, magas arányban fordulnak elő.

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

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az OTKA 104811 számú pályázata és az MTA Bolyai Ösztöndíj (TT), valamint az Alexander von Humboldt-ösztöndíj (SzB) támogatta. Továbbá köszönjük az Aggteleki Nemzeti Parknak, hogy lehetővé tette számunkra a LiDAR adatok kutatási célú felhasználását, illetve a Bécsi Műszaki Egyetem Geodéziai és Geoinformatikai Intézetének az OPALS-licenz biztosítását (KZs).

IRODALOM

BÁRÁNY-KEVEI I. – MEZŐSI G. (1991): Further morphometrical data from some important Hungarian Karst areas. Proceed. of the Int. Conf. on Environ. Changes in Karst Areas-IGU-UIS. - Quaderni del Dipartimento di Geografia 13. Università di Padova. pp. 137-142.

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

CARVALHO, O. A. – GUIMARÃES, R. F. – MONTGOMERY, D. R. – GILLESPIE, A. R. – TRANCOSO GOMES, R. A. – DE SOUZA MARTINS, É. – SILVA, N. C. (2013): Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. – Remote Sensing 6(1). pp. 330-351.

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 Hydrology. – Unwin Hyman, London 560 p.

- GOSTINČAR, P.* (2013): The application of GIS methods in morphometrical analysis of dolines on limestone and dolomite bedrock. – 16th International Congress of Speleology Proceedings, Brno, pp. 84-88.
- KEMMERLY, P. R.* (1986): Exploring a contagion model for karst-terrain evolution. – *Geol. Soc. of Am. Bull.* 97(5). pp. 619-625.
- KOBAL M. – BERTONCELJ I. – 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, pp. 113-118.
- MANDLBURGER, G. – OTEPKA J. – KAREL W. – WAGNER W. – PFEIFER N.* (2009): Orientation And Processing Of Airborne Laser Scanning Data (OPALS) – Concept and First Results of a Comprehensive ALS Software. in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, Part 3/W8, pp. 55-60.
- MARI L.* (2003): Felszínborítás-változás vizsgálata térinformatikai módszerekkel az Aggteleki Nemzeti Park területén. – *Karsztfelődés VIII.*, pp. 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 morphomtery in a fluviokarst region: eastern Highland Rim, Tennessee, USA – *Zeitschr. Geomorph.* 27(1). pp. 39-54.
- MONTANÉ 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.
- OTEPKA J. – MANDLBURGER G. – KAREL W.* (2012): The OPALS Data Manager – Efficient Data Management for Processing Large Airborne Laser Scanning Projects. *ISPRS Annals, Comm. III, Volume 1-3*, pp. 153-159.
- PARDO-IGÚZQUIZA E. – DURÁN J. J. – DOWD P. A.* (2013): Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. – *Acta Carsologica* 42(1), pp. 17–24
- PÉNTEK K. – VERESS M. – SZUNYOGH G.* (2000): Karsztos formák matematikai leírása függvényekkel. – *Hidr. Közl.* 80(4), pp. 197-205.
- PFEIFER N. – MANDLBURGER G. – OTEPKA J. – KAREL W.* (2014): OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. – *Computers, Environment and Urban Systems*, 45., pp. 125-136.

- STRAHLER, A.N.* (1964): Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks – In: Chow, V. T. (szerk.): Handbook of Applied Hydrology, McGraw Hill Book Company, New York.
- TELBISZ T.* (2001): Új megközelítések a töbör-morfológiában az Aggteleki-karszt példáján – Földrajzi Közlemények, 125 (1-2) pp. 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. – ADÁM 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, pp.25-34.
- TELBISZ T. – MÓGA J.* (2005): Töbör-morfometriai elemzések a Szilicei-fennsík középső részén – Karsztfejlődés X., pp. 245-266.
- TELBISZ T. – MÓGA, J. – KÓSIK SZ.* (2006): Töbör-morfometriai elemzések a Szilicei-fennsík délnyugati részén – Karsztfejlődés XI., pp. 133-152.
- 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., pp. 207-213.