

OMLÁS ÉS CSÚSZÁSVESZÉLYES PARTFALAK ÁLLÉKONYSÁGÁNAK KOMPLEX BIZTOSÍTÁSA A DUNAI MAGASPARTOKON – AZ ÉPÍTETT RÉZSÚK ERÓZIÓVÉDELME ÉS MONITOROZÁSA

BALOGH JÁNOS–JAKAB GERGELY–SZALAI ZOLTÁN–
SZEBERÉNYI JÓZSEF–VICZIÁN ISTVÁN

STRENGTHENING OF POTENTIALLY COLLAPSING AND SLIDING BLUFFS ALONG DANUBE RIVER – EROSION PREVENTION AND MONITORING OF ARTIFICIAL SCARPS

Abstract

The protection of loess bluffs along the Danube river and of the potentially sliding and collapsing high bluffs at Lake Balaton is mainly resolved applying complex geotechnical solutions e.g. the artificial terraces on the high bluff in Dunaújváros. These constructed bluffs are stable and secure to great heights and the erosion hazard is minimal in the absence of harmful effects like the presence of surface and subsurface waters. With in depth knowledge of engineering-geomorphologic researches, efficient and high tech bluff protection can be provided.

It is practical to implement monitoring systems for the continuous measurement of the efficiency of surface stabilisation and protection, especially prior to bluff rehabilitation and after the construction works have been finished.

An efficient method has been developed recently for the research of soil erosion potential of artificial scarps by the Geographical Institute, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences of the Hungarian Academy of Sciences. With the utilisation of medium sized, portable rainfall simulators, the stability of scarps can be determined under the actual environmental field conditions.

Since 2004 new opportunities have been found for the rehabilitation of potentially moving bluffs at numerous settlements in the country. According to the II National Development Plan, EU resources can be allocated to local municipalities after the consideration of tenders. It is the responsibility of geoscientists to realise technologically feasible solutions which consider the geological potentials, conform with the landscape and, most importantly, prevent disastrous events that potentially result in billions of HUF in property damages and/or endanger the life of citizens.

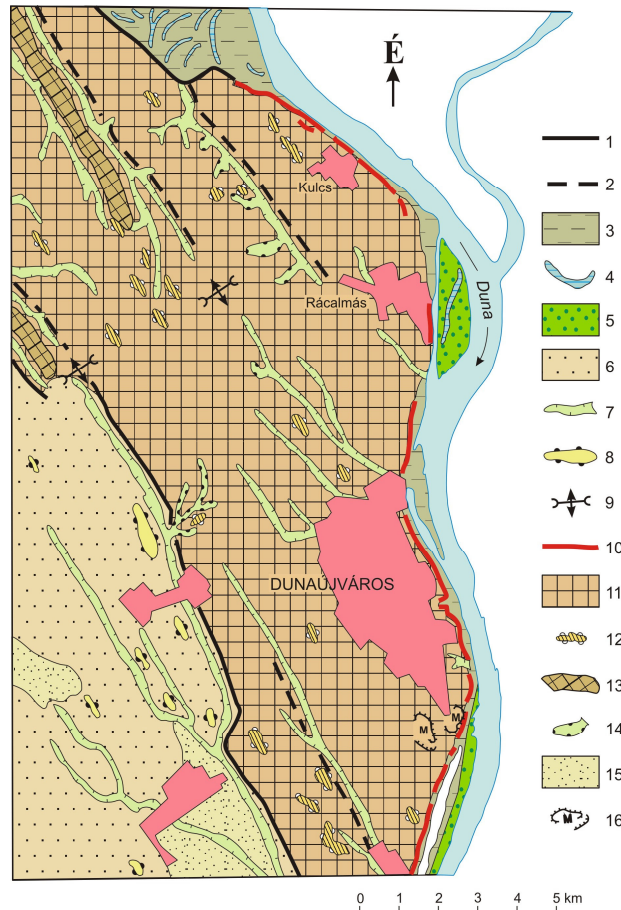
Keywords: Danube, bluff, collapse, landslide, erosion, bluff rehabilitation

Bevezetés

Az MTA CSFK Földrajztudományi Intézetben évtizedek óta kiemelt kutatási program a felszínmozgásos területek vizsgálata és mérnökgeomorfológiai térképezése (PÉCSI M. 1959, ÁDÁM L. et al. 1976, SCHWEITZER F. 1999, SCHEUER GY. 1979, SCHEUER GY.–SCHWEITZER F. 1984. FODOR T.-NÉ et al. 1981, BALOGH J. et al. 2008, BALOGH J.–SCHWEITZER F. 2011, BUGYA T. et al 2011). A felszínmozgásokkal kapcsolatos kutatásoknak fontos része az omlás és csúszásveszélyes partfalak állékonyságának komplex vizsgálata.

A Duna mentén az omlás- és csúszás-veszélyes partfalak állékonyságának komplex biztosítására szolgáló partfal védelmi műszaki beavatkozások és az ezekhez kapcsolódó partfal rehabilitációs vizsgálatok az 1964. évi nagy dunaújvárosi földcsuszamlás eseményei után gyorsultak fel. Dunaújvárosban ekkor építették ki a jelenleg is hatékonyan működő

partvédelmi rendszert KÉZDI ÁRPÁD tervei szerint, amit később a havária eseményeknek megfelelően tovább alakítottak. A földtömegmozgásos események napjainkban is gyakoriak, az ezredforduló óta több esetben előfordultak Dunaújváros környezetében (1. ábra) és más dunai magasparti településeken is.



1. ábra. Dunaújváros környezetének geomorfológiai térképe (Szerk.: BALOGH J. 2011)

1. tektonikus árok, medence perem: 2. törésvonal 3. alacsony ártér 4. lefűzött meander 5. zátony sziget erdővel borítva 6. löszös üledékekkel fedett hordalékkúp síkság 7. eróziós völgy általában 8. futóhomok bucka 9. vízválasztó 10. tömegmozgásokkal veszélyeztetett magaspart 11. löszplató 12. eróziós-deráziós tanúhegy 13. völgyközi hát 14. deráziós völgy általában 15. futóhomok felszín 16. meddőhányó

Figure 1 Geomorphologic map of Dunaújváros and its surroundings (Compiled by BALOGH, J. 2011)

1. tectonic graben, basin edge, 2. fault line, 3. low flood plain, 4. abandoned channel, 5. bar covered by forest, 6. alluvial fan mantled by loess, 7. erosional valley undistinguished, 8. dune sand, 9. divide, 10. bluff endangered by mass movements, 11. loess plateau, 12. erosional-derosional butte, 13. interfluvium, 14. derasional valley, 15. wind-blown sand surface, 16. dump, waste heap

A dunai omlás- és csuszamlás-veszélyes magaspart-szakaszok megelőző kutatásainak és partfal-rehabilitációs beruházásainak háttérét korábban (1975–2007) központi forrásból finanszírozták (pl. pincerendszerek, természetes partfalak és földcsuszamlások veszélyelhárítási munkálatainak támogatása) ez a forrás azonban azóta már megszűnt. A Belügyminisztérium 2004-ben az omlásveszélyes magaspartokkal rendelkező települések értékeinek védelmében hosszú távú beavatkozási programot hirdetett meg Európai Unió források terhére, ennek keretében indultak meg a Duna menti és Balaton környéki

tömegmozgásokkal veszélyeztetett magaspartokon a beruházások. Az új, széles körű pályázati lehetőségnek köszönhetően az önkormányzati tulajdonban lévő partszakaszok rehabilitációs munkálataira jelentős források nyíltak meg. Az *I. táblázat* adatai is jól mutatják, hogy milyen komoly lehetőséget és feladatot jelentenek az érintett települések önkormányzatainak a felmért, kiemelten veszélyes szakaszok partfalvédelmi beruházásai. A partfalvédelmi beruházások szükségességét és pénzügyi indokoltságát a védendő létesítmények értékének meghatározásával támasztják alá. A "vis major" keret a jogszabályi előírás miatt, csak az önkormányzati tulajdonban bekövetkező károk finanszírozását teszi lehetővé, az állami tulajdonú, állami kezelésben lévő infrastruktúrákban keletkező károkat azonban nem (OSZVALD T. 2011).

I. táblázat. Az omlás és csúszásveszélyes partfalakkal rendelkező települések és az állékonyság komplex biztosításának tervezett költségei a dunai magaspartokon (KENESEI J. et al. 2005)

Table 1 Calculated values to be protected and costs of investment for the strengthening of potentially collapsing and sliding bluffs at various settlements along the Danube river (KENESEI, J. et al. 2005)

Település	partfal- hossz (m)	védendő érték (millió Ft)	stabilizáció költsége (millió Ft)
Gönyű	2 550,0	2 362,6	563,0
Nyergesújfalu	2 500,0	2 151,9	328,5
Esztergom	2 900,0	7 423,0	381,9
Szob	1 380,0	571,5	400,9
Zebegény	2 240,0	2 835,2	564,8
Verőce	1 270,0	1 727,3	283,7
Nagymaros	7 020,0	5 860,2	2 291,9
Visegrád	2 480,0	2 187,3	849,0
Tahitótfalu	800,0	2 385,4	635,4
Érd	2 290,0	2 457,1	1 588,1
Ercsi	1 990,0	5 361,4	1 083,8
Kulcs	8 790,0	6 822,5	2 740,6
Rácalmás	4 570,0	8 891,5	1 990,4
Dunaújváros	7 500,0	603 442,0	39 780,2
Dunaföldvár	4 750,0	11 930,0	7 795,5
Bölcske	420,0	896,7	368,6
Paks	9 350,0	17 046,0	2 837,0
Szekszárd	9 600,0	25 722,0	3 557,0
Várdomb	760,0	308,6	225,0
Báta	6 200,0	8 360,0	3 963,0
Dunaszekcső	5 860,0	4 581,7	2 466,4
Baja	1 180,0	3 872,6	1 134,0
ÖSSZESEN:	86 400,0	727 196,5	75 828,7

Tanulmányunk célja, hogy felkeltse a figyelmet a partfalvédelem tervezésében és a kiviteli munkák keretében alkalmazandó geomorfológiai szemléletre, az épített rézsűk erózióvédelmére és monitorozására vonatkozóan.

Magaspart-védelmi módszerek

A felszínmozgásos folyamatok kialakulását számos műszaki beavatkozással lehet megelőzni. A döntéshozók és beruházók a beruházás tervezési szakaszában körültekintő terepi kutatásokkal és a műszaki lehetőségek figyelembevételével együttesen tesznek javaslatot a leghatékonyabb magaspart védelmi módszer alkalmazására (BALOGH J. 2008; BALOGH J.–SCHWEITZER F. 2011). Az átgondolt, tervezett településfejlesztés, a biztonsági szempontok, az építési előírások hatósági szabályozása és építéshatósági betartatása, a műszaki létesítmények biztonságos üzemelése, a környezetvédelmi előírások, a természeti értékek, a hatékony környezetgazdálkodás, a nemzetgazdasági értékek megóvása szükségszerűvé teszi a partfal-rehabilitációk optimális tervezését és monitorozását is. A természeti tényezők és a lehetőségek feltárása után a leghatékonyabb és leggazdaságosabb komplex partfalbiztosítási módszer kiválasztása a cél. Sok esetben csak egy hagyományos támfal és egy erősített földszerkezet megépítésére van szükség, de gyakoribb, hogy egy bevált komplex magaspartvédelemi módszer alkalmazása (pl. Dunaújváros) a legcélravezetőbb.

A magaspartok, talajszerkezetek, az erősített földtömegek kialakítására kidolgozott módszerek közül a legfontosabbakról rövid áttekintést adunk, de az alább bemutatott módszerek nem ölelik fel az összes lehetőséget. Számtalan olyan gyakorlati megoldás példázza a mérnöki ötletességet, amely a komplex partfalvédelem kialakításában már megvalósult.



2. ábra Nyergesújfalu Sánc-hegy 11-es út melletti geotextiliákkal hatástalanul védett lejtője
(Fotó: BALOGH J. 2009)

Figure 2 Inefficient protection of scarp using geotextile along route 11 at Nyergesújfalu Sánc-hegy
(Photo by BALOGH, J. 2009)

Ilyen beavatkozás például a *lokális szilárdságnövekedést eredményező idegen anyagok (pl. geotextiliák) bevitele*. Valamennyi beavatkozás a nyírószilárdság növelését célozza. Komplex

partfalvédelemnek tekinthetjük pl. a puha agyagtalajok víztelenítésére alkalmas, függőleges helyzetű, bordás műanyag szalagok talajba juttatásával végzett eljárást. A homok- és kavicscölöpök is felfoghatók talajerősítő szerkezetként. A földtömegek erőegyensúlyát kedvezőbbé lehet tenni idegen anyagok behelyezésével. A betétek lehetnek hossz méretükhöz viszonyítva kicsiny keresztmetszetűek, azaz huzalok, rudak, hálók, textíliák. A partfalak és rézsúk stabilizálására használt geotextíliák funkciójukat tekintve használhatók partfalak és töltések mechanikai erősítésére. A nem körültekintő kivitelezés és a környezeti kutatásokat nem figyelembe vevő tervezés miatt számos helyen a geotextíliás partvédelem nem fejt ki hatását és csak költségnövelő tényezőként működik a partfal-rehabilitációk során (2. ábra).

Napjainkban előtérbe került a *kőtámfalak „gabionok” építése*, amely a helyszínen kövel megrakott acélrótt szerkezetekből állnak. A gabionok tömegüknél fogva biztosítják a meredek rézsúk állékonyságát, míg a talajtámfalaknál a rézsúbe rétegesen beépített acél-, illetve műanyaghálók biztosítják azt. A „gabion” támfalak rugalmasak, ugyanakkor a bekövetkező talajmozgások nem okoznak teherbíró-képesség csökkenést a már megépült támfalszerkezetekben, ellentétben a merev betonszerkezetű támfalakkal, ahol a megjelenő repedések és törések végül a támfal tönkremenetelét okozzák.

Az egyik leghatékonyabb partvédelem a *támfalak rézsús lépcsőzése*, és a növényzettel kombinált magasparti falak kialakítása, a rézsú köröm gabionnal történő megtámasztása. A dunai magaspart több településén, elsősorban beépített területeken alkalmazták. Dunakömlődön a pincesorokkal bemélyített löszfalak aljában a házak mögött közvetlenül a 2–3 m magas vasbetontámfalakkal támasztották meg a rézsús kialakítású lépcsőrendszert, amelynek felszínét növényzettel, vagy geotextíliákkal fedték be a löszrétegek földtani, litológiai sajátosságainak megfelelően (3. ábra).



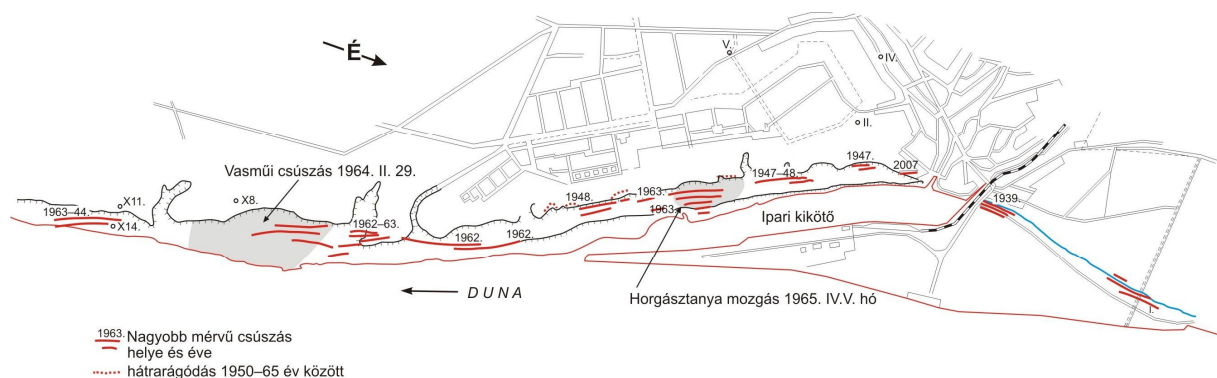
3. ábra. A dunakömlödi magaspart-rehabilitáció kivitelezési munkái (Fotó: BALOGH J. 2003)
 Figure 3 Bluff rehabilitation works under way at Dunakömlöd (Photo by BALOGH, J. 2003)

A löszterületek hagyományos partvédelmi megoldása a meredek *lőszfalak lépcsőzése*. A függőleges lőszfalak ameddig a káros hatásoktól – talajvíz, erózió – védve vannak nagy magasságig stabilak,. Ez a megoldás önmagában nem akadályozza meg egyes kisebb földtömegek leszakadását, ezért a földtámfal lábánál padkát hagynak. Az 1950-60-as években Dunaújvárosban is így valósították meg a városi partvédelmet (KÉZDI Á. 1978, 4. ábra). Az épített magasparti szakaszok hibái azonban hamar megmutatkoztak mivel a Mezőföld felől érkező talajvizek és a városi víziközmű hálózat meghibásodásaiból származó káros felszínalatti vizek omlásokat és csuszamlásokat okoztak (5. ábra). A csapadék okozta talajerózió pedig a meredek lépcsős falak felszínét pusztította, ezért az 1970-80-as években 3-3 lépcsős rézsűvé alakításával átépítették a partvédelmi földtámfal rendszert (6. ábra).



4.ábra. Dunaújvárosi lépcsős magaspart-védelem az 1950-60-as években (Fotó: KÉZDI Á. 1978)

Figure 4 Bluff protection at Dunaújváros by creating artificial terraces in the 1950–60s
(Photo by KÉZDI, Á. 1978)



5. ábra. Dunaújváros dunai magaspartjának felszínmozgásokkal érintett szakaszai

Szerk.: BALOGH J. (2011) KÉZDI Á. 1970 és NAGY I. (1980, ex. verbis) adatainak felhasználásával
Figure 5 Areas of bluffs at Dunaújváros having affected by surface movements. Compiled by BALOGH, J. (2011) using data of KÉZDI, Á. (1970) and NAGY, I. (1980 ex. verbis)



6. ábra. A dunaújvárosi rézsús partfalvédelem (Fotó: BALOGH J. 2008)
 Figure 6 Scarp protection at Dunaújváros (Photo by BALOGH, J. 2008)

Szintén fontos partvédelmi módszer a *rézsűfelszínek erősítése növényzettel*. Számos példa azt bizonyítja, hogy a növénytakaró jelentős mértékben hozzájárul a magaspartok állékonyságának növeléséhez. A fűfélék, cserjék és fák gyökérzete átszövi a talaj legfelső rétegét. A gyökereknek, elemi szálaknak, számottevő húzószilárdsága van, és általában véletlenszerű elrendeződésben erősítik a 0,1–0,4 m vastagságú földréteget. A gyökerekkel átszőtt földréteg a földművek felületén szinte súlytámfalként vehetők figyelembe (PÁLOSSY L. et al. 1985), és ily módon meredekebb rézsúk is kialakíthatók. Például az erdei fűzike (*Epilobium angustifolium*) gyökerei a lejtéssel ellentétes irányban hosszúra nőnek és így függesztő hatást tudnak kifejteni. Meredek rézsúben a földmunka végzésekor (vagy esetleg utólag) 2–2,5 m hosszú, 15–20 mm átmérőjű fűzhajtásokat helyeznek el. A fűz (*Salix*) nagyon sok fajtája alkalmas erre a célra: a betemetett hajtásokon mellégyökérzet fejlődik ki, amely néhány hónap alatt eléri a 0,1–0,2 m hosszúságot. Mérnökgeomorfológiai megfontolások alapján a talajadottságok széles tartományában tervezhető kedvező növénytakaró. Ilyenkor figyelembe kell venni pl. a talaj ásványi összetételét, pH-értékét, stb.

A víz, mint a partfalak állékonyságát befolyásoló tényező

A magaspart-rehabilitáció során kialakított burkolatlan, vagy növényzettel nem megfelelően védett mesterséges felszínek kialakításánál alapvető kérdés, hogy a terület miként fog reagálni a környezeti hatásokra. Különösen fontos tényezők a csapadék beszivárgása, illetve a felszíni lefolyás mértéke. A felszín alá szivárgó víz mind fizikailag, mind kémiaailag megváltoztathatja a kialakított struktúrát, míg a felszínen rekedő csapadék lejtőirányba elfolyik ezze megbonthatja a felszínt, eróziót okozhat (RÉTHLY A. 1962, 1970). E folyamatok vizsgálata fokozottan indokolt a magaspartok mentén épített rézsús földtámfalak

esetében, hiszen a dunai magasparti települések peremén kialakított meredek rézsűk fokozottan ki vannak téve a lefutó vizek bevágódásának, másrészt állékonyságuk leromlása, esetleges sérülésük komoly környezeti katasztrófához vezethet. Egy olyan frekventált partvédelmi rendszerben, mint a dunaújvárosi is előfordulhatnak földtömegmozgásos folyamatok (7. ábra).



7. ábra. Vonalas eróziós és szuffóziós formák a dunaújvárosi magasparton a kőtár alatt. (Fotó: BALOGH J. 2008)
Figure 7 Features of gully erosion and piping upon the bluff at Dunaújváros, below the lapidarium
(Photo by BALOGH, J. 2008)

A partfalmozgások bizonyítják, hogy az omlások, csuszások és a talajerózió mellett a szuffózió (oldási erózió) is komoly felszínformáló szerepe van (7-9. ábra) (FAULKNER, H. 2006, KERTÉSZ Á.–CENTERI CS. 2006). A löszrétegek terhelése során a mészhártyákban és a cementáló kötésekből finom hajszálrepedések képződnek, ezek mentén a szegletvizek okozta kohézió adja egy adott löszösszlet stabilitását (JONES, J.A.A. 2004). Ha azonban a megterhelt lösz vízzel telítődik, ez a hatás megszűnik, a löszszerkezet összeroskad, szétrombolódik, a magaspartok mentén megkezdődnek a tömegmozgásos folyamatok. A káros felszínalatti vizek áramlásuk révén olyan oldási folyamatokat is generálnak, amelyek részben, vagy akár teljes mértékben kioldják az érintett löszréteg mésztartalmát. A löszrétegben mozgó felszínalatti víz áramlási irányába felléphetnek szuffóziós folyamatok, aminek következtében alagosodás is kialakulhat.



8. ábra. Szuffúziós folyamatok miatt károsodott partvédelmi út Dunaújvárosban a partfal-rehabilitáció előtt
(Fotó: BALOGH J. 2008)

Figure 8 A passage damaged by suffusion at Dunaújváros prior to scarp rehabilitation
(Photo by BALOGH, J. 2008)



9. ábra. Szuffúziós folyamatok miatt károsodott partvédelmi út Dunaújvárosban a partfal-rehabilitáció után
(Fotó: VARGA G. 2013)

Figure 9 A road previously damaged by suffusion at Dunaújváros and then rebuilt as part of scarp rehabilitation
(Photo by VARGA, G. 2013)

A legtöbb partvédelmi tervben a talajfizikai paraméterek vizsgálata mellett általában nem készítenek talajkémiai vizsgálatokat pl. a legtöbb esetben nincs adat a mozgásveszélyes földtömeg rétegeinek mézstartalmára. Az oldási erózió felszínalatti hatásait geofizikai módszerekkel célszerű feltárni, mint ahogy azt az MTA CSFK munkatársai a 2011-es kulcsi partfalmozgásokkal összefüggésben vizsgálták (PRODÁN T. et al. 2013).

Szemléletes példája a szuffúzió hatásának a felszínfejlődésre a somogybabodi vízgyűjtőn a vonalas eróziós folyamatok és az oldási erózió hatására extrém csapadékviszonyok mellett napok alatt keletkezett eróziós vízmosás kialakulása 2010-ben (CZIGÁNY SZ. et al. 2011). Az elmúlt évek felszínmozgásos eseményei (Dunaújváros, Kulcs, Rácalmás, Ercsi, Dunaföldvár, Paks, Dunaszekcső, Baja) és kárai fokozottan megerősítik azt a geomorfológia által többször megfogalmazott igényt, hogy a magaspartok védelmében a nyírószilárdság fenntartását és a szerkezeti adottságokat is vizsgáló talajeróziós monitoring rendszert kell kiépíteni. A rézsűk mentén hosszú távú monitorozásra alkalmas Wischmeier–Smith eróziós mérőkeret kell kialakítani MSZ 20133 szerint. A 9 % -os, egyenletes lejtésű, $22,4 \times 1,98$ m alapterületű lejtőszakaszokon a természetes csapadékok talajelhordó hatását mérhetjük, valamint a geotextiliák talajvédő hatását is lehet vizsgálni (10. ábra).



10. ábra. Geotextiliával és növényzettel fedett kísérleti Wischmeier–Smith eróziós mérőkeret
(Fotó: JAKAB G. 2007)

Figure 10 Wischmeier–Smith plots covered with geotextile and vegetation (Photo by JAKAB, G. 2007)

Az épített rézsűk stabilitásának vizsgálata terepi mesterséges esőztetéssel

Az MTA CSFK Földrajztudományi Kutatóintézetében az ezredforduló környékén egy hatékony módszert dolgoztunk ki az épített rézsűk talajeróziós adottságainak kutatására. A terepi méréseket egy hordozható, közepes méretű eső-szimulátorral végezzük, ami lehetővé teszi, hogy ténylegesen a mintaterületen tapasztalható körülmények között határozzuk meg az

épített rézsűk állékonyságát befolyásoló tényezőket, a vizsgált rézsűszakasz víznyelő és vízáteresztő képességét, illetve a felszín állékonyságát a lefolyó vízzel szemben. A természetes állapotú, „érintetlen” megfigyelt téglalap alakú parcella nagysága $6\text{ m} \times 2\text{ m} = 12\text{ m}^2$, amelyet az esésvonalakkal párhuzamos hossz-tengellyel tűztünk ki. E területnagyság már jól tükrözi a felszín heterogenitását, jelentősen csökkenti a szegélyhatás okozta hibát, következésképp sokkal megbízhatóbb eredményt ad, mint az 1 m^2 nagyságrendű mintaterületet vizsgáló esőztető berendezések.

Az eső-szimulátorral végzett mérések során lehetőség nyílik a vizsgált parcella konstans vízáteresztő-képességének meghatározására (CSEPINSZKY B.–JAKAB G. 1999; JAKAB G.–SZALAI Z. 2005; CENTERI Cs. et al. 2012; SZÜCS P. et al. 2006). A módszer nagy előnye, hogy a hagyományos módszerekkel (keretes beáztatás, laboratóriumban vizsgált, bolygatatlan talajminta, stb.) szemben a helyszínen, természetes körülmények között, „in situ” mérhető, a vizsgált terület pedig 12 m^2 , amely méretéből adódóan sokkal jobban tükrözi a talaj heterogenitását. A kijelölt kísérleti parcellát a nem kívánatos el- és ráfolyás meggátlására függőleges fémlemezekkel határoljuk. Az öntözött terület minden irányban minimum $0,5\text{ m}$ -rel a megfigyelt területet meghaladja, azaz a megfigyelt területnek közel a dupláját – $3\text{ m} \times 7\text{ m}$ -t – esőztetjük a „szegélyhatás” mérséklése érdekében (11. ábra).

Az esőintenzitás talajeróziós hatásait (szántóföldi vízkapacitásig feltöltött talajoknál) 30 , 40 , 60 , 90 és 130 mm h^{-1} intenzitások mellett mérjük.

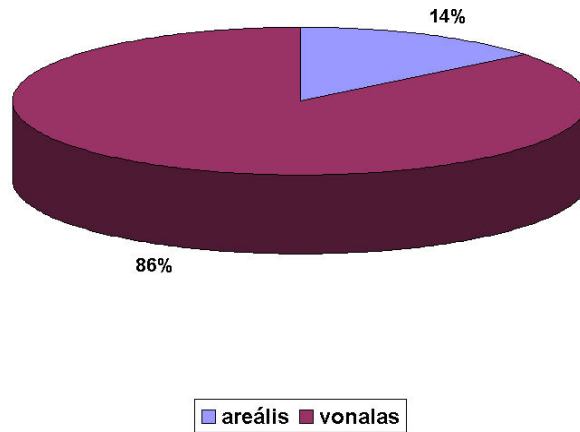


11. ábra. Eső-szimulátorral végzett mérések épített rézsűszakaszon (Fotó: SZALAI Z. 2004)
 Figure 11 Monitoring measurements with rainfall simulator on artificial scarp (Photo by SZALAI, Z. 2004)

A talajerózió, a rézsű állékonyság és a növényvel védett felszín kapcsolata

Az épített részüfelszíneken a talajlehordásnak alapvetően az épített rézsű felszíneken két fő típusát különböztetjük el, nevezetesen az areális, vagy lepel eróziót, amely a felszín egészét pusztítja, és a mikrodomborzatból adódó vízösszefolyások mentén kialakuló, a

megnövekedett víztömeg energiájából fakadó vonalas eróziót. A dögölt épített rézsű felszínén a vizsgálatok megkezdésekor a meglévő mikrobarázdák a vonalas erózió kialakulásának és terjedésének kiinduló helyei (12-13. ábra).



12. ábra. Az összes lehordott anyag megoszlása az erodálódás típusa szerint (JAKAB G. – SZALAI Z. 2005)
Figure 12 Distribution of total soil loss by the type of erosivity (JAKAB, G. –SZALAI, Z. 2005)



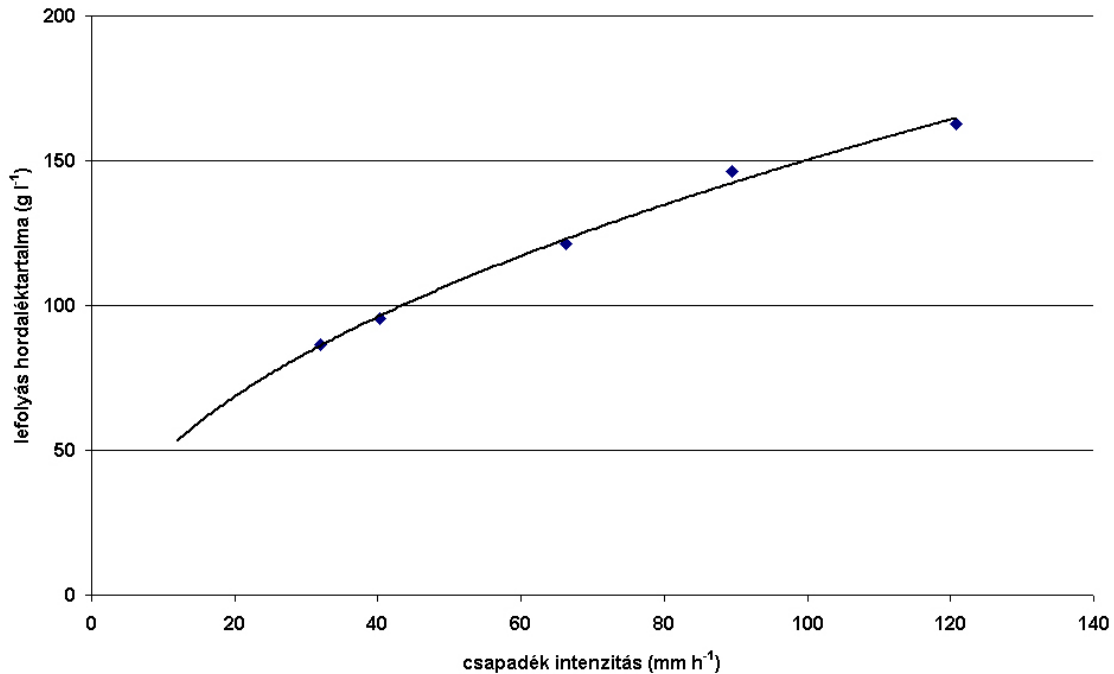
13. ábra. A vonalas erózió nyomai a fedetlen parcellán, az eső-szimulátoros mérések után (Fotó: JAKAB G. 2004)
Figure 13 Traces of rill erosion on an uncovered plot following rainfall simulation measurements
(Photo by JAKAB, G. 2004)

A lefolyó víz mennyisége, párban a lefolyás időadataival igazolja, hogy állandó intenzitású esőterhelés mellett kezdetben egységnyi idő alatt mind több és több víz távozik a területről. A növekvő ütemű lefolyás kivétel nélkül, minden esetben nagyobb hordalékszállítást mutat. Adott intenzitású kezelésen belül a hordalék sűrűsége az idő négyzetgyökével egyenes arányosságban nő.

A talajelhordás mennyiségéért a lepelerózió esetében nem elsősorban a növekvő víztömeg, sokkal inkább a talajfelszín elért cseppek száma és kinetikai energiájuk a felelős. Ezt látszik alátámasztani az esőztetés befejezése után a területről lefolyó víz hordalék szállító képessége. Ez az érték a nagyobb intenzitású kezelések esetében nem éri el az esőztetés átlagos egységnyi vízre jutó hordalék szállítását, míg a kisebb intenzitású kezeléseknél meg is haladja azt. Ennek pontos oka még tisztázásra vár, de valószínűsíthető, hogy a lepelerózió csak a nagy intenzitásoknál okoz jelentős talajpusztulást, amely az esőterhelés megszűntével leáll. A kisebb intenzitások esetében a vonalas talajelhordás szerepe a meghatározó, ebből adódhatnak a növekvő hordalékszállítás értékek. Ha a kezeléseken belüli hordalékszállítási értékeket átlagoljuk, az adott intenzitáshoz tartozó lefolyás sűrűség értékét kapunk. Ily módon meghatározható az intenzitás és a lefolyás sűrűsége közötti összefüggés, amely az alábbi egyenlettel írható le (JAKAB G.–SZALAI Z. 2005, 14. ábra):

$$\text{lepusztulás (g/l)} = 15,927(\text{intenzitás (mm/h)})^{0,4874}$$

$$R^2 = 0,9958$$



14. ábra. A lefolyás szárazanyag tartalma és a csapadékintenzitás közötti összefüggés döngölt löszön
 Figure 14 Relationship between soil content of runoff and rainfall intensity on stiff loess

Eső szimulátorok, talajeróziós parcellák, WEPP és MEDRUSH modellek alkalmazása az épített rézsűk erózióvédelmében és monitorozásában

A dunai magaspártok partfal rehabilitációs munkáinak ismerete alapján feltűnő, hogy az épített rézsűk mozgásmentességre vonatkozó monitorozási módszerekből hiányoznak a nemzetközi gyakorlatban is elfogadott talajeróziós vizsgálatok. Az eső-szimulátoros és talajeróziós mérőkertekben mért adatokból, olyan felületvédelemre vonatkozó vegetáció-stabilitási és a geotextiliák hatékonyságát megalapozó eredményeket lehet generálni, amelyek igazolják a partfalvédelem hatékonyságát az épített, vagy építendő magasparti szakaszon.

A modellezés nagy előnye, hogy e módszer segítségével becsülhetővé válnak az egyes környezeti feltételek megváltozásából eredő hatások (SZALAI Z. et al. 2010). Az eltérő lejtőszögek, a rézsű és korona fedő anyaga és annak vastagsága mind olyan változó, melynek hatását – az eső-szimulátoros mérések eredményeire támaszkodva – számszerűsíteni lehet. Összehasonlíthatóvá válik továbbá egy adott felszín viselkedése a rajta található vegetáció mennyiségének és összetételének függvényében. Ezen túlmenően becsülhetjük a tervezett felszín viselkedését eltérő klíma-forgatókönyvek esetén is, akár egyedi csapadékesemények, akár hosszú távú változások esetén (CENTERI Cs. et al. 2009). Az egyedi csapadékesemények modellezése a WEPP modellel történik.

A *WEPP modell* (NEARING, M. et al. 1989) a hidrológia, a talajfizika, a növénytan, a hidraulika és az eróziós mechanizmus ismerete, illetve kölcsönhatásai alapján becsüli a terület felszínfejlődését. Legjelentősebb előnyei közé tartozik, hogy képes a talajveszteség térbeli és időbeli eloszlásának becslésére (a nettó talajveszteség a teljes lejtőszakaszon, ill. a lejtő profil minden egyes pontján napi, havi, éves átlagban becsülhető), valamint az, hogy a modell folyamat alapú jellegéből adódóan számos olyan körülményhez illeszthető, amikor gyakorlati vagy gazdasági okokból a terepi mérések nem megvalósíthatóak.

A MEDRUSH modellt az Európai Unió MEDALUS tudományos projektje keretében fejlesztette ki a londoni Kings College és a University of Leeds kutatógárdája a kilencvenes években (KIRKBY, M. 1999). A modellt folyamatosan úgy fejlesztették tovább, hogy közép-európai viszonyokra is alkalmazható legyen (TÓTH A. et al. 2001). A modell elsősorban a vízhálózat változásait és az eróziós viszonyok előrejelzését szolgálja, ugyanakkor rendelkezik talajhidrológiai és némi vegetációdinamikai előrejelzési képességekkel is.

Mindkét modellben – az esőztetett eredmények alkalmazásával – számítható a növényzettel borított rézsű felszíneken egy esetleges klímaváltozás esetén, ill. extrém nagy intenzitású csapadékeseményekkor tapasztalható felszíni elfolyás. A vizsgált rézsűkön a megfelelő növényborítás mellett elhanyagolható az erózió általi veszélyeztetettség. Az épített döngölt rézsűfelületeken, növényborítás nélküli löszfedő még a jelenlegi csapadékviz viszonyok mellett sem nyújt védelmet a beszivárgó víz ellen, ugyanakkor állékonysága sem kielégítő. A felárkolódás még extrém csapadékesemények hiányában is gyorsan bekövetkezik. A rézsűk legfelső fedőrétege képes a csapadékvíz időleges tárolására, amelyet a növényzet ismételtlen a légkörbe juttat, ezért tápanyagban gazdag vastagítása kívánatos. A hosszú távú modellezés alapján számítható a felületi lepelerozió és vonalas erózió okozta lepusztulás.

Konklúzió

2013 decemberében az MTA CSFK Földrajztudományi Intézet szervezésében megrendezett "*Talajeróziós kerekasztal*" konferencián az épített rézsúk felületvédelme, a talajeróziós, geomorfológia kutatási eredmények és módszerek alkalmazásának jelentőségéről tartottunk előadást.

A kerekasztal egyik megállapítása volt, hogy a települések környezetében – ahol a mérnöki műtárgyakat a tájba illően kell elhelyezni – a magaspártvédelem tervezésében és a kiviteli munkák előkészítésében növelni kell a geomorfológiai jellegű monitoring vizsgálatokat.

A tárgyalt partfal monitorozási eljárások és műszaki beavatkozások természetesen nem terjedhetnek ki az omlás- és csuszamlás-veszélyes folyamatok minden eshetőségére. A veszélyeztetett dunai magaspártokon a már működő és tervezett partfal-rehabilitációk vizsgálatában hívjuk fel a döntéshozók, tervezők és önkormányzatok figyelmét a geomorfológiai kutatások fontosságára. Ezen belül a terepi mesterséges esőztetés és erózió mérés előnyeire, a számítógépes modellezés széleskörű használhatóságára a magaspártok védelmében. Ez a módszer lehetővé teszi, hogy nagy megbízhatóságú és emellett térben és időben is jól kiterjeszthető adatokat nyerjünk az időjárás hatásainak kitett mesterséges felszín hidrológiai tulajdonságairól és felszínfejlődéséről. Megítélésünk szerint e módszer jól alkalmazható minden olyan mesterséges és természetes felszín vizsgálatánál, melynek stabilitását hosszú távra szeretnénk garantálni.

A célorientált geomorfológiai kutatások tudományos megállapításokkal segíthetik egy-egy magaspártvédelmi szakasz biztonságos megvalósulását, a műszaki munkák ütemezését, a tervezés és döntéshozatal folyamatát (környezeti hatáselemzések, pénzügyi és költséghaszon elemzések, hatástanulmányok).

A tárgyalt vizsgálati módszerek alkalmazásával biztonságosabban megvalósulnak azok a célkitűzések, projektek, amelyek az omlásveszélyes partfalak káreseményeire irányulnak. A stabilizációval kapcsolatos kutatások bővülésével a környezeti értékek, a felszínmozgásos területek védelme és a környezetbiztonság növelése valósul meg, így a mozgásveszélyes magaspártokkal rendelkező településeken egy biztonságosabb élhetőbb környezet alakulhat ki.

BALOGH JÁNOS
MTA CSFK, Földrajztudományi Intézet, Budapest
balogh.janos@csfk.mta.hu

JAKAB GERGELY
MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, Budapest
jakab.gergely@csfk.mta.hu

SZALAI ZOLTÁN
MTA CSFK Földrajztudományi Intézet
szalai.zoltan@csfk.mta.hu

SZEBERÉNYI JÓZSEF

MTA CSFK Földrajztudományi Intézet
szeberenyi.jozsef@csfk.mta.hu

VICZIÁN ISTVÁN
MTA CSFK Földrajztudományi Intézet
viczian.istvan@csfk.mta.hu

IRODALOM

- ÁDÁM L.–JUHÁSZ Á.–SCHWEITZER F.–SZILÁRD J. 1976: Magyarország felszínmozgásos területének földtani–műszaki katasztere. – Tolnai dombság, Duna-mente. MTA FKI, Bp. 55 p.
- BALOGH J. 2008: Bátaapáti magasparti területeinek tömegmozgásai és a partvédelem műszaki megoldásainak lehetőségei. – In: SCHWEITZER F.–BÉRCI K.–BALOGH J. (szerk.) A Bátaapátiban épülő Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló környezetföldrajzi vizsgálata, Budapest, MTA FKI, pp. 122–135.
- BALOGH J.–SCHWEITZER F.–VICZIÁN I. 2008: Bátaapáti magasparti területeinek tömegmozgásai és a partvédelem műszaki megoldásának lehetőségei. – In: SCHWEITZER F.–BÉRCI K.–BALOGH J. (szerk.) A Bátaapátiban épülő Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló környezetföldrajzi vizsgálata, Budapest, MTA FKI, pp. 122–135.
- BALOGH J.–SCHWEITZER F. 2011: Felszínmozgásos folyamatok a Duna Gönyű-Mohács közötti magasparti szakaszán – In: SCHWEITZER F. (szerk.) *Katasztrófák tanulságai: stratégiai jellegű természetföldrajzi kutatások.* Budapest. MTA FKI, 2011. pp. 101–142.
- BUGYA T. –FÁBIÁN SZ.–GÖRCS N.–KOVÁCS I.–RADVÁNSZKY B. 2011: Surface changes on a landslide affected high bluff in Dunaszekcső (Hungary). – *Central European Journal of Geosciences* 3. 2. pp. 119-128.
- CENTERI CS.–BARTA K.–JAKAB G.–SZALAI Z.–BÍRÓ Zs. 2009: Comparison of EUROSEM, WEPP, and MEDRUSH model calculations with measured runoff and soil-loss data from rainfall simulations in Hungary *Journal of plant nutrition and soil science* 172. 6. pp. 789–797.
- CENTERI CS.–JAKAB G.–SZALAI Z.–MADARÁSZ B.–SISAK I.–CSEPINSZKY B.–BIRO Zs. 2012: Rainfall simulation studies in Hungary In: MELEKHIN, D. S.–DOLUKHANOV, M. F. (szerk.) *Environmental research summaries. Volume 4.* 330 p. New York: Nova Science Publishers pp. 189–190.
- CSEPINSZKY B.–JAKAB G. 1999: Pannon R-02 eső-szimulátor a talajerózió vizsgálatára In: SÉNYI PNÉ (szerk.) "Agrárjövők alapja a minőség" 41. *Georgikon Napok. Keszthely: Pannon Agrártudományi Egyetem,* pp. 294–298.
- CZIGÁNY SZ.–FÁBIÁN SZ.Á.–PIRKHOFFER E.–VARGA G. 2011: Villámárvizek: a kisvízfolyások hirtelen áradásának problémái. – In: SCHWEITZER F. (szerk.) *Katasztrófák tanulságai: stratégiai jellegű természetföldrajzi kutatások.* Budapest, MTA FKI, pp. 155–163.
- FAULKNER, H. 2006: Piping hazard on collapsible and dispersive soils in Europe. In: BOARDMAN, J.–POESEN, J. (eds) *Soil erosion in Europe.* John Wiley and Sons, Chichester. pp. 537–562.
- FARKAS J. 1996: Felszínmozgások elleni védekezés. – *Közúti Közlekedési- és Mélyépítéstudományi Szemle,* 46. 4. pp. 169–182.

- FODOR T.-NÉ–HORVÁTH ZS.–SCHEUER GY.–SCHWEITZER F. 1981: A Dunakömlőd–Paks közötti dunai magaspárt mérnökgeológiai térképezése és vizsgálata. – *Földtani Közlöny*, 111. 2. pp. 258–280.
- JAKAB G.–SZALAI Z. 2005: Barnaföld erózióérzékenységének vizsgálata esőztetéssel a Tetves-patak vízgyűjtőjén *Tájökológiai Lapok* 3. 1. pp. 177–189.
- JONES, J.A.A. 2004: Pipe and piping. In GOUDIE, A.S. (ed.): *Encyclopedia of Geomorphology* Vol. 2. Routledge, London. pp. 784–788.
- KENESEI J.–MAROKHÁZI G.–NAGY J. 2005: Mozgásveszélyes Duna-menti és Balaton parti magaspártok veszélyelhárítási munkáinak tanulmányterve, Kézirat. 71p
- KERTÉSZ Á.–CENTERI Cs. 2006: Hungary. – In: BOARDMAN, J.–POESEN, J. (eds) *Soil erosion in Europe*. John Wiley and Sons, Chichester. UK pp. 139–154.
- KÉZDI Á. 1970: A dunaújvárosi partrogyás. – *Mélyépítéstudományi Szemle*, 20. 7. pp. 281–297.
- KÉZDI Á. 1978: *Talajmechanikai példák és esettanulmányok*. –Budapest, Tankönyvkiadó 271 p
- KIRKBY, M. 1999: Application and further development of the MEDRUSH model. – *Book of Medalus III. Final report*. pp. 528–559.
- NEARING, M.A.–FOSTER, G.R.–LANE, L.J.–FINKNER, S.C. 1989: A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project Technology. – *Transactions of the ASAE*, 32. 5. pp. 1587–1593.
- OSZVALD T. 2011: Földcsuszamlások 2010-ben, „Klíma-21” Füzetek 63. pp. 169–193.
- PÉCSI M. 1959: *A magyarországi Duna-völgy kialakulása és felszínalakítása*. – Budapest, Akadémiai Kiadó p. 346.
- PÁLOSSY L.–SCHARLE P.–SZALATKAY I. 1985: *Földtámfalak*. – Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 227 p
- PRODÁN T.–PRÁCSER E.–BALOGH J.–KIS É.–NOVÁK A.–UDVARDI B.–VICZIÁN I. 2013: Geoelektromos tomográfia Kulcs település felszínmozgásos területén. In: TÖRÖK Á.–GÖRÖG P.–VÁSÁRHELYI B. (szerk.) *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika*, Budapest, Hantken Kiadó, pp. 49–58.
- RÉTHLY A. 1970: *Időjárási események és elemi csapások Magyarországon I–II*. – Budapest, Akadémiai Kiadó, p. 622.
- SCHEUER GY 1979: A dunai magaspártok mérnökgeológiai vizsgálata. – *Földtani Közlöny*, 109. 2. pp. 230–254.
- SCHEUER GY.–SCHWEITZER F. 1984: A dunai magaspártok lösz-összetének deformációs formái és töréses szerkezete. – *Mérnökgeológiai Szemle*, 33. pp. 145–162.
- SCHWEITZER F. 1999: Omlás- és csuszamlásveszélyes dunai magaspártok, kapcsolatukvonalas létesítményekhez és a településekhez. – In: TÓTH J.–WILHELM Z. (szerk.) *Változó környezetünk. Tiszteletkötet Fodor István professzor úr 60. születésnapjára*. – Pécs, Janus Pannonius Tudományegyetem, pp. 300–315.
- SZALAI Z.–BALOGH J.–JAKAB G. 2010: Erózióbecslés változó klimatikus viszonyok között. *Klíma 21 Füzetek* 62. pp. 75–80.
- SZÜCS P.–CSEPINSZKY B.–SISÁK I.–JAKAB G. 2006: Rainfall simulation in wheat culture at harvest *Cereal Research Communications* 34. 1. pp. 81–84.
- TÓTH A. –SZALAI Z. –JAKAB G. –KERTÉSZ Á. –BÁDONYI K. –MÉSZÁROS E. 2001: Talajpusztulás modellezése a MEDRUSH modell alkalmazásával. *Földrajzi Értesítő* 49. pp. 1–4.