

Folyók dinamikusan egyensúlyi állapotát becslő eljárás kidolgozása és alkalmazása a magyarországi Felső-Dunára

Nyiri Emese¹ és Török Gergely Tihamér^{2,3}

¹ Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műegyetem rkp. 3., 1111 Budapest, Magyarország (E-mail: nyiri.emese@edu.bme.hu)

² ELKH-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Műegyetem rkp. 3., 1111 Budapest, Magyarország

³ Víztechnológiai és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék (E-mail: torok.gergely@emk.bme.hu)

Kivonat

A folyók életében számos változás figyelhető meg, amely lehet számunkra előnyös és előnytelen is. Ezek a változások lehetnek mesterséges, illetve természetes eredetűek. Jelen kutatásban a mesterséges beavatkozások hatását figyeltük meg, főként a Bős-nagymarosi vízlépcső esetében. Minden folyó jellemezhető a dinamikusan egyensúlyi állapotával, illetve a morfológiai folyamatok ezt az állapotot közelíthetik. A kutatásban a magyarországi Felső-Duna egy szakaszát vizsgálva állítottunk fel egy modellt, amely a hordalék-háztartáson alapszik. Két szelvényre volt megfelelő adatmennyiség: Dunaremetére (1825,5 fkm) és Nagybajcsra (1810,0 fkm). A két szelvény múltbéli szakirodalmi adatai alapján paramétereztük fel a 0D modellt, amelyet későbbi adatok alapján igazoltunk. Több modellvizsgálatot is elvégeztünk, pl. számításba vettük a dunaremetei mederszűkülést, amely ~300 m-ről csökkent le ~170 m-re közel 58 év alatt. A példa alapján szemléltettük, hogy a modellel megbecsülhető egy adott beavatkozás hatása a medergeometriára, illetve a hidraulikai jellemzőkre. Minden szabályozási munkálatot tervezés előz meg, de a hordalék-háztartás nem minden esetben van számításba véve. Pedig a vizsgálataink is rámutatnak arra, hogy a hordalék-háztartás is jelentős hatást gyakorol a folyó geometriájára. A bemutatott eljárás fejlesztésre szorul, hiszen időben változó becslést nem tudunk vele adni és csak egy adott szelvényre alkalmazható. A folyómederben várható változások trendjének és nagyságrendjének számításával viszont jelentősen megtámogatja a folyószabályozási tervezést.

Kulcsszavak

Folyószabályozás, modellezés, morfológia, hordalék, dinamikusan egyensúly.

Development of a method for estimating the dynamic equilibrium state of rivers and its application to the Upper Danube in Hungary

Abstract

Many changes can be observed in the life of rivers which can have beneficial and unfavorable effects on humanity. These changes can be of artificial or natural origin. In the present study, we observed the impact of artificial interventions, mainly the effect of the Bős-Nagymaros hydropower dam. The so-called dynamic equilibrium state can characterize each river. Our study set up a model based on the sediment mass balance based on the Upper Danube in Hungary. There was sufficient data for two sections: Dunaremete (1825.5 rkm) and Nagybajcs (1810.0 rkm). Based on the literature data of the two sections, we parameterized a 0D model, which was validated by later data. We performed several model tests, e.g., we considered the narrowing of the Danube riverbed at Dunaremete, which decreased from ~ 300 m to ~ 170 m in almost 58 years. Based on the example, we illustrated that the model could estimate the effect of a given intervention on the bed geometry and the hydraulic characteristics. Predictions support all regulatory work, but sediment mass balance is rarely considered. However, our studies also show that sediment mass balance significantly affects river geometry. The presented method needs to be improved, as we cannot give a time-varying estimate, and it can only be applied to a specific section. However, calculating the trend and magnitude of the expected changes in the riverbed significantly supports river regulation planning.

Keywords

River regulation, modelling, morphology, sediment, dynamic equilibrium.

BEVEZETÉS

A folyók életében folyamatos morfológiai változás megy végbe. A medergeometria bizonyos hatásokra változik, ami lehet mesterséges eredetű vagy természetes folyamat. Így van ez a Duna folyóval is, ami megélt már jelentős szabályozásokat, települtek rá vízlépcsők, sarkantyúk és egyéb folyószabályozási műtárgyak. Alapvető kérdés, hogy ezek a beavatkozások vajon milyen hatással vannak a folyó morfológiai állapotára? A beavatkozások hatására a folyókban lejátszódó morfológiai folyamatok megváltozhatnak, egy korábbi lehetséges dinamikusan egyensúlyi állapot felborulhat. A legfontosabb kérdés az, hogy vajon milyen lesz az új dinamikusan egyensúlyi állapot? Mi lesz az új egyensúlyi állapotra jellemző meder-

szint, medermélység, mederesés és mederszélesség? Továbbá, ezek miként hatnak az emberi tevékenységekre, valamint az élővilágra?

Ezt a kérdéskört vizsgáltuk a magyarországi Felső-Duna szakaszán. Irodalomkutatás alapján két szelvényre találtunk megfelelő adatmennyiséget részletes morfológiai vizsgálatok elvégzéséhez. Ezek a dunaremetei (1825,5 fkm) és a nagybajcsi (1810,0 fkm) szelvények (1. ábra). A mederfelvételek rendszeres rögzítésén és a vízrajzi észleléseken túl mederanyag és hordalék-háztartási méréseket is végeztek ezekben a szelvényekben. Vizsgálatainkat ezen adatok alapján végeztük el. A szakirodalmi forrásokat és azok bemutatását a következő fejezetben ismertetjük.



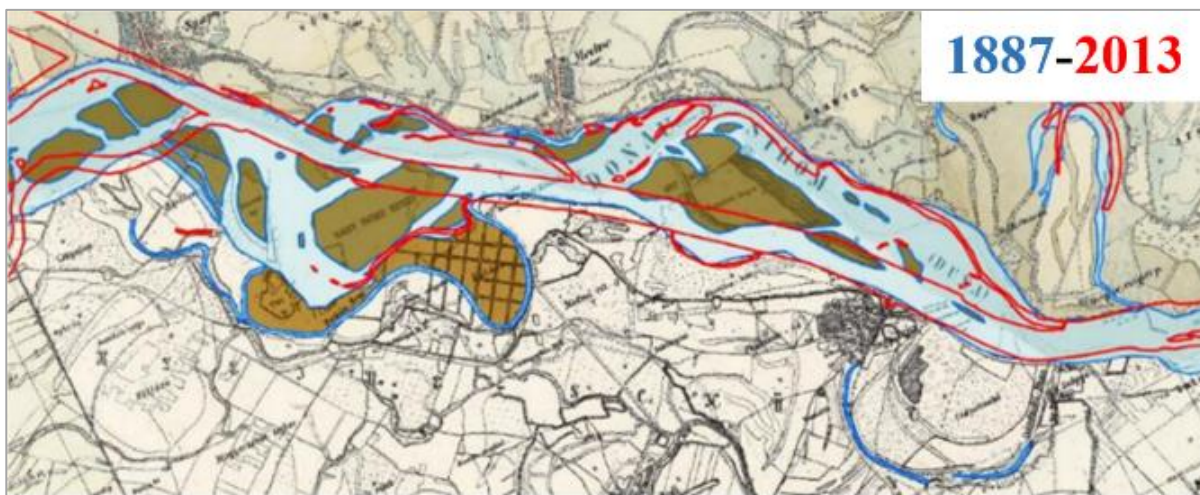
1. ábra. Vizsgált szelvények elhelyezkedése (Google Maps)
Figure 1. Location of the examined cross-sections (Google Maps)

A Felső-Duna a 19. századi szabályozás előtt fonatos jelleget mutatott, amit úgynevezett kontinentális delta torkolatnak is szokás nevezni (2. ábra). A Duna az osztrák szakaszon jellemzően durva kavicsos hordalékú, amely a Kisalföldre érkezve a hirtelen csökkenő esés következtében lerakódást eredményez (Török és Baranya 2017). A folyó által lerakott hordalék a medrében zátonyokat és szigeteket épített és ez idézte elő a folyó több ágra való szakadását. Az említett fonatos ágrendszernek a 19. századi

szabályozás vetett véget (Ihrig 1973). A szabályozás célja egy főmeder kialakítása volt, ami javítja a folyó árvízlevezető képességét és kedvezőbb hajózási feltételeket biztosít (3. ábra). 1881-1885 között hajtották végre a Felső-Dunán a szabályozásokat Vásárhelyi Pál tervei alapján. A 19. századi szabályozást később még további kisebb szabályozások követték, gondolva itt a vízlépcsők, illetve a sarkantyúk telepítésére (Holubová és társai 2004, Holubová és társai 2015, Török és Baranya 2017).



2. ábra. A Duna a 19. századi szabályozás előtt (Szombati 2016)
Figure 2. Danube River before the 19th century regulation (Szombati 2016)



3. ábra. Duna szabályozás előtt/után összehasonlítás (DuRe Flood project 2015)
Figure 3. Comparison before/after Danube regulation (DuRe Flood project 2015)

A legutolsó jelentős műszaki beavatkozás a bösi vízlépcső megépítése és üzembe helyezése volt. A vizsgált szelvények közül Dunaremete esetében a Duna elterelése a hordalék és a vízhozam tekintetében is jelentős csökkenést eredményezett. Hordalékra vonatkozóan nem találtunk adatot az elterelés utáni mennyiségre, a vízhozam tekintetében viszont ismert az 1980. évi adat (*Vízrajzi Évkönyv 1980*). A vízlépcső hatással van a nagybajcsi szakaszra is: feltehetőleg a hordalékviusszatartás okozott jelentős mederberágódást és a kavicspadok kiépülését (*Holubová és társai 2004, Holubová és társai 2015, Török és társai 2020*). Továbbá, ezt a szakaszt sarkantyúsorok kiépítésével is szabályozták a 20. század elején, melyek ugyancsak jelentős hatást gyakoroltak a szakasz morfordinamikai folyamataira.

Kérdéses, hogy a beavatkozásokkal befolyásolt szakaszokon meghatározható-e az új dinamikus egyensúlyi állapot? Ha igen, akkor azt megbecsülve megállapítható-e annak megléte?

A dinamikus egyensúlyi állapot megállapítását terepi mérések, laboratóriumi kísérletek és numerikus modellezés segítségével lehetséges vizsgálni. Terepi mérések alapján való vizsgálathoz térben és időben részletes és minden tipikus morfológiai folyamatra kiterjedő adatrögzítés szükséges. A magyarországi Felső-Duna esetében a rendelkezésre álló adatok alapján Török és Baranya kísérelték meg az egyensúlyi állapot meglétének vizsgálatát 2017-ben publikált tanulmányunkban (*Török és Baranya 2017*). A végső következtetésük szerint a bösi vízlépcső hatására bekövetkező mederváltozások a gönyői térségben (1799-1794 fkm) már nem számottevőek, ami alapján dinamikus egyensúlyi állapot megléte feltételezhető. Az eljárás segítségével a vizsgált rövid szakaszra vonatkozóan lehetett következtetést levonni, a kampányszerű mérések által érintett szakaszokra vonatkozóan viszont csak becslések tehetők (például a vizsgált szakasz felvizen elhelyezkedő nagybajcsi szakaszra vonatkozóan).

Numerikus modell alapú vizsgálatok is készültek az érintett szakaszra. Részletesebben vizsgálták a Duna 1801-1794 fkm közötti szakaszát (*Baranya és társai 2015, Török és társai 2019, Török és társai 2020*). A 3D numerikus

modell előnye a részletes térbeli számítás, azonban a nagy számítási kapacitás miatt csak rövidebb, hónapos nagyságrendű időszak modellezése lehetséges. Az eredmények alapján fontos és egyedi következtetéseket vontak le, de bizonytalanságot jelenthet, hogy az eljárás nem ad lehetőséget a morfordinamikai trendek évtizedes léptékben való feltárására, valamint a vizsgálat csak a modellezett szakaszra vonatkozik, a bösi vízlépcső és a gönyői szakasz közötti térség azonban ezen kívül helyezkedik el.

Jelen vizsgálataink során egy, a dinamikus egyensúlyi állapot becslésére kidolgozott külföldi eljárást (*Parker 2004*) adaptáltunk a hazai Felső-Dunára. Az eljárás olyan fizikai alapú egyenletekre épül, ami közel állandó éves hordalék- és vízhozamot feltételezve becsüli meg az egyensúlyi állapothoz tartozó főbb geometriai adatokat. A kiválasztott két szelvény (*1. ábra*) példáján keresztül bemutatjuk az egyes beavatkozások hatásának mértékét, elsősorban a mederesésre és mederszélességre.

ANYAG ÉS MÓDSZER

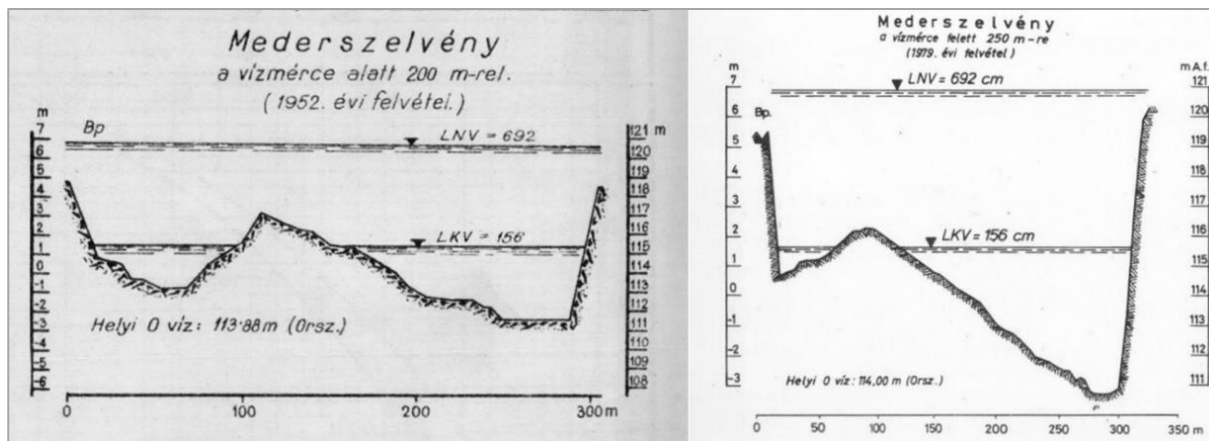
Morfológiai állapotértékelés irodalmi források alapján

Az adatgyűjtés kettős célt szolgál: egyrészt a rendelkezésre álló adatok alapján megkísérélhető körütekintő megállapításokat tenni a morfológiai folyamatokra vonatkozóan (*Török és Baranya 2017*). Másfelől pedig a modellparaméterezéshez és igazoláshoz szükséges a megbízható adatok megléte. A 19. századi szabályozások előtti időszakra vonatkozóan érdemi információt nem találtunk. A legkorábbi, jelentős mennyiségű adatrögzítésre az azt követő, de még a bösi vízlépcső üzembe helyezése előtti időszakban került sor, a 20. század második felétől.

A kutatáshoz több szakirodalmat is feldolgoztunk, hasznosítottunk. Nagy segítségre szolgált *Bogárdi János* „*Vízfolyások hordalékszállításai*” (*Bogárdi 1955*) és *Török Kálmán* „*A Duna és szabályozása*” (*Török 1952*) című könyve. Továbbá a *Vízrajzi Évkönyveket* (*OVF 2020*) és több angol nyelvű közleményt is tudunk forrásként hasznosítani (*Holubová és társai 2015, Holubová és társai 2004*). A vizsgált szakaszon két szelvényenél találtunk megfelelő adatmennyiséget: Nagybajcs (1810,0 fkm) és

Dunaremete (1825,5 fkm). A szelvényeknél több morfológiai jellemzőt is meg kellett vizsgálni, valamint adatot gyűjteni, mint pl. a medergeometria, a hordalékház-tartás, illetve a hidraulikai (szelvényátlagolt áramlási sebesség, energiavonal esése) és hidrológiai jellemzők (jellemző vízhozam, jelentős hordalékszállításra képes vízjárás tartóssága).

A szelvények közül csak Dunaremetére volt mederfelvétel a Vízirajzi Évkönyvekben (OVF 2020). A dunaremetei szelvény 1952. és 1979. évi mederfelvételeinek (4. ábra) összevetése alapján jelentős változások figyelhetők meg. Ezen szelvény alapján arra lehet következtetni, hogy a meder nem feltétlenül volt dinamikusan egyensúlyi állapotban a bőszi vízlépcső építése (1980-as évek) előtt.



4. ábra. Dunaremetei mederváltozások 1952 és 1979 között (Vízirajzi Évkönyv 1959. és 1980.)

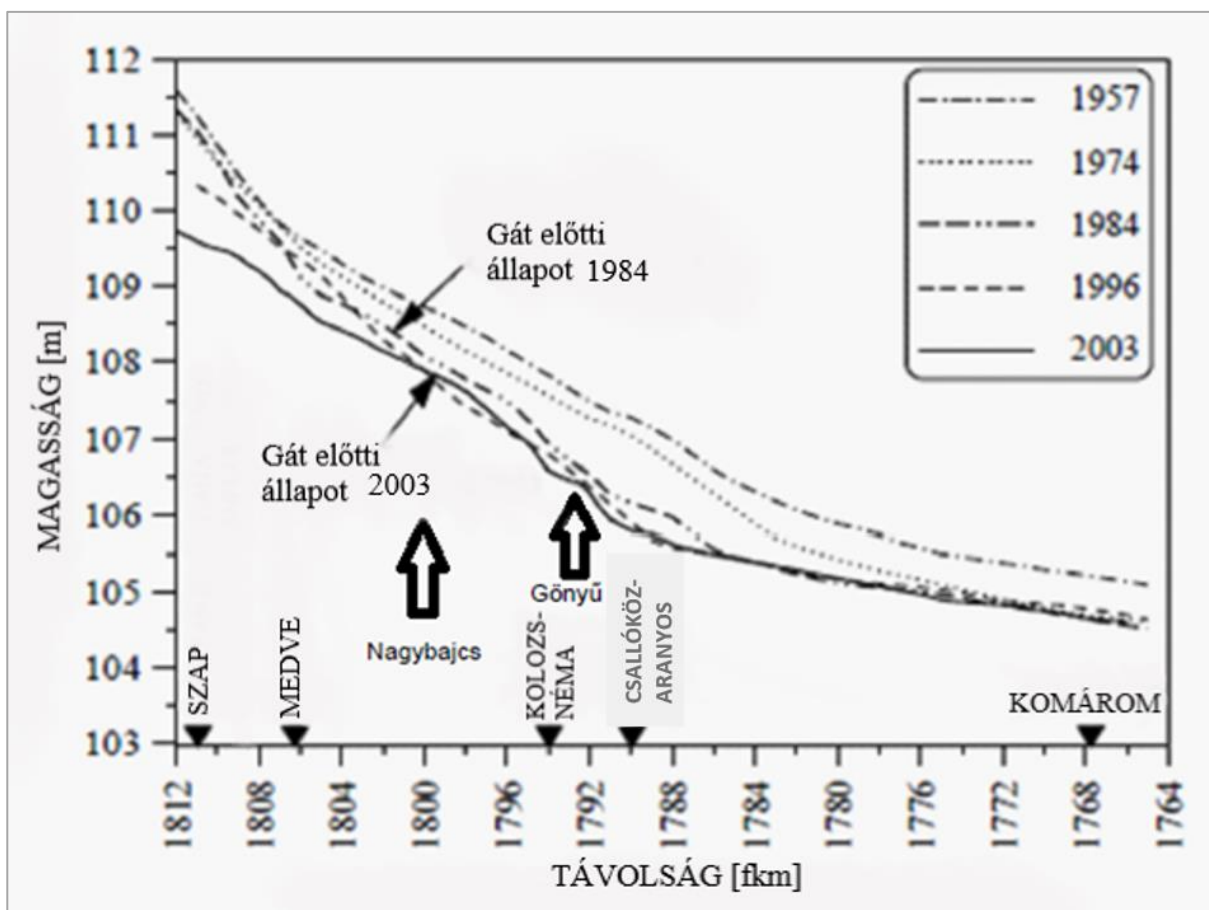
Figure 4. Riverbed changes at Dunaremete between 1952 and 1979 (Hydrographic Yearbook 1959. and 1980.)

További geometriai jellemző a folyó szélessége, amely a szabályozással változott és a hajózás érdekében is történtek olyan változások, melyek hatással voltak a szélesség alakulására. A 19. századi szabályozásra vonatkozó tervezett és megvalósult adatok alapján azt szeretnénk bemutatni, hogy a folyó morfológiai adottságai határt szabnak bizonyos medergeometriai kialakítási elképzeléseknek. Nagybajcsón a tervezési szélesség 420 m volt, de a munkálatok végére nem sikerült ezt elérni (Tóry 1952). A 19. századi szabályozás során a nagybajcsi szelvényen végül kialakított szélesség 380 m volt. Dunaremeténél hasonló tapasztalatok voltak, hiszen a tervezett szabályozási szélesség 400 m volt és körülbelül 325 m szélesre valósult meg. A tervezett szélességet azért kellett redukálni, mert a túl széles kialakítás alacsonyabb fajlagos hordalékszallító kapacitása nem volt képes a felvízről érkező hordalék továbbállítására, ezért annak egy része lerakódott (Tóry 1952). Természetes körülmények között is megfigyelhető ez a jelenség, ami végső soron gázlós szakasz kialakulásához vezet. A folyószabályozások előtti időszakban az ilyen folyószakaszokat keresték a túlpárt eléréséhez, hiszen a gázlós szakaszon várható a legalacsonyabb vízmélység, a legkisebb áramlási sebességgel. A 20. század elején a Dunára sarkantyúkat telepítettek a nagybajcsi szakaszra. A sarkantyúkkal a meder tovább szűkült, ezt a számításaink során is figyelembe vettük. A vizsgált szelvények közül ez a beavatkozás csak a nagybajcsi szelvényt érinti, ahol az így redukált szélesség 250 m lett.

A folyó hosszúsága is kulcsszerepet játszik a folyó morfológiai folyamataiban. A medereséssel jól közelíthető az energiavonal esése, ami végső soron a folyó hordalékszallító kapacitását határozza meg. A szabályozás előtt a mederesés Passau és Dévény között 25-45 cm/km és Szap alatt 15-20 cm/km volt. További szakirodalmi forrás szerint Szap felett a vízszin esése 25-35 cm/km volt, ami rövid

szakaszokon akár 45-50 cm/km is lehetett. Szap alatt viszont már egy rövid átmeneti szakaszon 12-15 cm/km volt tapasztalható és Gönyűtől lefelé csupán 8-10 cm/km-es adatokat jegyeztek fel (Tóry 1952). A 19. századi szabályozásokat követően Gönyűnél az eséstörés egyre jobban kirajzolódik, amelyet a következő ábrán látható hossz-szelvények is bemutatnak. Ha egy szakaszon eséstörés tapasztalható, akkor feltételezhető, hogy a hordalékszallító kapacitás is jelentősen csökken. Ez azt vonja maga után, hogy a szakaszra érkező hordalék egy része lerakódik, ami ugyancsak a dinamikusan egyensúlyi állapot hiányára utal (5. ábra).

A mederszint változását (erózió, vagy feltöltődés) a hordalékszallító kapacitás, valamint a görgetett hordalékhozam aránya határozza meg. Emiatt a görgetett hordalék alakulása kulcsszerepet játszik a morfordinamikai vizsgálatok során. A vizsgált szakaszra a görgetett hordalékhozamból idősort állítottunk elő. Erre az adatra/adatsorra azért is van szükségünk, mert intenzívebb áramlás mellett a görgetett hordalék folyó a medrét rombolja, vagyis medereróziót okoz, ezáltal a medergeometriát is alakítja. Ezután a víz kisebb energiával ezeket a szemcséket hordja addig, amíg el nem éri az alsó szakaszt, ahol lerakja a hordalékát. A hordalékhozamot összefüggésbe tudjuk hozni a víz mélységével, a víztükör szélességgel, a medereséssel és a szemcseátmérővel is. Túlságosan visszamenőleg nem tudunk mérési eredményeket felmutatni, mert a görgetett hordalékhozam mérése nagyon összetett és körülményes munka. A sokéves idősor átlagával közelítettük a jellemző éves hordalékhozamot, ami Dunaremeténél 730 000 t/év, míg Nagybajcsnál 484 000 t/év átlagos görgetett hordalékterhelést jelent. Lebegtetett hordalék hatását nem vettük figyelembe, mivel az kevésbé játszik szerepet a főmeder alakulásában, inkább a part menti sávok, illetve sarkantyúk közötti területek feliszapolódásának vizsgálatában játszik kulcsszerepet (Pomázi és társai 2020a, 2020b).



5. ábra. Dunai kisvízszint hossz-szelvények 1957-2003 (Holubová és társai 2004)
Figure 5. Low water level profiles between 1957 and 2003 (Holubová et al 2004)

Fontos jellemző még a hordalék szemcseméret, amit a D_{50} átlagos szemátmérővel szokásos jellemezni (Ermilov és társai 2020), így ezt az értéket alkalmaztuk mindkét szelvénynél. Dunaremeténél az átlagos görgetett hordalék szemcseméret 18,3 mm volt jellemző a szabályozások előtt, míg Nagybajcsnál ez már csak 7,50 mm volt. Felvetődhet a kérdés, hogy ezt a nagy változást pontosan mi okozhatja csupán 27 km-es távon? Vizsgáltuk, hogy a szemcse kopása mekkora mértékű lehet a Düll-féle összefüggés alapján (Bogárdi 1955). Azt az eredményt kaptuk, hogy a 18,3 mm-es szemcseméret 27 km alatt 16,3 mm-es átmérőre redukálódhat a kopás hatására. Figyelembe véve a nagybajcsi méretet megállapítható, hogy a kopás hatása a vizsgált szakaszon elhanyagolható. Ezek alapján az a következtetés tehető meg, hogy a szemcseméret jelentős csökkenését a szelektív erózió okozza (Rákóczi 1981). A szelektív erózió azonban nem csak a szemcseméret csökkenésében mutatkozik meg: a folyamat szakaszok közötti lerakódást is feltételez. Ezek alapján viszont a vizsgált időszakokra vonatkozóan (a vízlépcső üzembehelyezése előtt) dinamikus egyensúlyi állapotról nem beszélhetünk.

Az irodalmi adatok (Tóry 1952, Bogárdi 1955, Holubová és társai 2004, Holubová és társai 2015, OVF 2020) vizsgálata alapján tehát a következő megállapításokat tettük: a vizsgált szakaszon nem áll fenn a dinamikus egyensúlyi állapot. Mindez látható az adatokon, hiszen jelentős a szelvények közti hordalékhozam különbség, amely főleg a szakaszon lévő lerakódást mutatja, tehát a folyó tölti a

medret. Ha az egyensúlyi állapot fennállna, akkor a szemcseméret csökkenése kopás útján menne végbe, de számításaink alapján ez elenyésző változást mutat. A lerakódásról árulkodhatnak a szakaszon eltérő esések, ahol a meredekebb részekon erózió is előfordulhat, míg a kisebb esésű szakaszon a hordalék lerakódik. Mindezek azt támasztják alá, hogy a Dunán nincs egyensúly.

MODELLALKOTÁS

A folyószakasz dinamikus egyensúlyi állapotát egy úgynevezett 0D modell segítségével szándékoztunk vizsgálni. A modellépítésnél alkalmazott megközelítést és egyszerűsítéseket Parker online jegyzetei alapján tettük meg (Parker 2004). A 0D modell azt jelenti, hogy egy szelvényre értelmezendő az egyenletrendszer, ami folyásirányban érdemi változás híján szakaszléptékben értelmezhető. A leírás a valós medergeometriát egy téglalap alakú szelvényvel közelíti, melyet egy magasság (H) és egy szélesség érték (B) jellemez. A folyómeder prizmatikus, valamint az áramlás permanens és egyenletes. A permanens jelleg a hordalékhozamra is vonatkozik, tehát állandó a hordalékhozam, illetve a mederanyag és a hordalék szemcseméretei megegyeznek. További közelítés, hogy a valós, nempermanens áramlás és hordalékmozgás morfordinamikai hatása egy évre vonatkozóan a mederkitöltő állapottal jellemezhető. A mederkitöltő állapot geometriai jellemzői a mederkitöltő vízhozam (Q_{bf}), vízmélység (H_{bf}), mederszélesség (B_{bf}) és esés (S), illetve a mederkitöltő állapotnál szállított hordalékhozam (Q_b). A mederkitöltő állapot alapú

morfológiai vizsgálat egy feltétele a hordalékmenyi-
ség éves mérlegének kielégítése. Ez azt jelenti, hogy a va-
lós éves változó hordalékmozgást kétféle állapottal köze-
lítjük: az egyik a mederkitöltő állapot, amikor a meder-
mozgás történik. A másik olyan kisvízes állapot, amikor
érdemi medermozgás nem történik. Az ún. periodicitás
(angolul intermittency, rövidítése I) azt mutatja meg, hogy
a mederkitöltő vízhozamnak az év mekkora részében ($0 \leq I \leq 1$)
kell jelen lennie ahhoz, hogy az a valós átlagos éves
hordalékmenységet szállítsa. Az év hátralevő részében
($1-I$) elhanyagolhatóan kicsi hordalékmozgást feltétele-
zünk. Ezt a feltételt kielégítve azt várhatjuk, hogy a me-
derkitöltő vízhozam alapú vizsgálattal a dinamikusan egyen-
súlyi állapot közelíthető (Parker 2004). Ezt a megköze-
lítést számos kutatómunka alkalmazta már sikerrel (Eke és
társai 2014, Naito és Parker 2019).

Alapegyenletek

Az alapegyenletek összefüggéseit angol tanulmá-
nyokra (Parker 2004, Li és társai 2015) támaszkodva ha-
tároztuk meg. A vizsgálatokhoz alkalmazandó modell az
anyag és energiamegmaradás törvények alapján írható fel.

Folyadékra vonatkozó folytonossági egyenlet:

$$Q_w = UHB, \text{ ahol} \quad (1)$$

Q a folyó vízhozama [m^3/s], U a szelvény-középsébség
[m/s], B a szelvény szélessége [m] és H a vízmélység, vagy
medermélység [m].

Impulzus egyenlet:

$$\left(\frac{\tau_b}{\rho}\right) C_f U^2 = gHS, \text{ ahol} \quad (2)$$

τ_b a fenék-csúsztatófeszültség [N/m^2], ρ a víz sűrűsége
(1000 kg/m^3), C_f a dimenziómentes mederellenállási té-
nyező, g a nehézségi gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$) és S a meder
esése [-].

Hordalékra vonatkozó folytonossági egyenlet:

$$Q_b = Bq_b(R + 1)t, \text{ ahol} \quad (3)$$

Q_b a hordalékhozam [kg/s], q_b a fajlagos hordalékhozam
[kg/sm], R a hordalék víz alatti súlya ($R = \rho_s/\rho - 1 = 1,65$,
ahol ρ_s a hordalék sűrűsége, 2650 kg/m^3) és t az el-
telt idő [s].

Hordalékhozam számítása: a fajlagos hordalékhozamot az
alábbi összefüggéssel számítjuk:

$$q_b = q_b^* \sqrt{RgDD}, \text{ ahol} \quad (4)$$

q_b^* a dimenziómentes fajlagos hordalékhozam, mely szá-
mítására számos hordaléktranszport modellt publikáltak.
A szakirodalomban megtalálható összefüggéseket terepi,
illetve laboratóriumi mérések alapján dolgozták ki, vagyis
tapasztalati összefüggésekről beszélünk. A legfontosabb
különbség közöttük, hogy eltérő szemcseméretre javasol-
ják őket. A modernnek mondott hordaléktranszport model-
lek ismérve, hogy az ún. dimenziómentes fenék-csúsztató-
feszültség (τ_b^*) és kritikus fenék-csúsztatófeszültség (τ_c^*)

függvényében becsülik a dimenziómentes hordalékhozamot.
Számításainkhoz Wong és Parker transzportmodelljét
használtuk. A modellt az alábbi összefüggés adja:

$$q_b^* = 3,97 * (\tau^* - \tau_c^*) ; \tau_c^* = 0,0495 \quad (5)$$

A szakirodalmi vizsgálatok alapján a rendelkezésre
álló, egy frakciót feltételező modellek közül az általunk is
használt Wong és Parker (2006) modellje van a legmeg-
bízhatóbbként számon tartva. Hangsúlyozni kell azonban,
hogy valójában a vizsgált folyószakasz vegyes szemössze-
tételű, vagyis egy vegyes szemösszetételre kidolgozott
összefüggéstől még nagyobb megbízhatóság és pontosság
lenne elvárható. Alkalmazásához azonban részletes adat
szükséges a meder- és hordalék szemösszetételét illetően,
ami nem állt rendelkezésünkre.

A dimenziómentes csúsztatófeszültséget az alábbi ösz-
szefüggéssel számíthatjuk (Parker 2004):

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D} = \frac{HS}{RD} \quad (6)$$

A 0D modellnél ez az egyenletrendszer értendő úgy,
hogy a változók mindegyike a mederkitöltő állapotra vo-
natkozik. Ahhoz, hogy az egyenletrendszer határozott le-
gyen (pontosan egy megoldása legyen), négy ismeretlen
kell tartalmaznia. Az adott probléma határozza meg, hogy
éppen melyek az ismert paraméterek és azok függvényé-
ben számíthatók az ismeretlenek. Vizsgálataink kapcsán
azonban az elmondható, hogy mivel a mederkitöltő álla-
potra vonatkozó mederközépsébségre (U), vízmélységre
(H) és jellemzően a dimenziómentes csúsztatófeszültségre
(τ^*) vonatkozóan nem állt rendelkezésünkre adat, azok
mindig az ismeretlenek halmazát alkották és már csak egy
további ismeretlent tudunk becsülni (ez jellemzően az S
esés volt).

Szabadfolyású állapotot feltételezve az egyenletrend-
szer tovább bővíthető, így az öt ismeretlenessé válik. Li és
társai (2015) közleménye szerint a mederanyag, meder-
esés és a mederkitöltő állapothoz tartozó dimenziómentes
csúsztatófeszültség közötti kapcsolatot, az alábbi öszse-
függéssel lehet leírni:

$$\tau_{bf}^* = 1220(D^*)^{-1} S^{0,53}. \quad (7)$$

Az összefüggésben D^* az ún. dimenziómentes szemcsemé-
ret, ami az alábbi összefüggéssel számítható:

$$D^* = \frac{(Rg)^{1/3}}{v^{2/3}} D \quad (8)$$

Az egyenletben a v a folyadék kinematikai viszkozitása,
melynek értéke $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Li és társai (2015) által megállapított kapcsolat csak
szabadfolyású medrek esetében igaz. A vizsgált Felső-
Duna szakasz a 19. század végére szabályozottá vált, part-
biztosítást kapott, ezért a szabályozás utáni állapotára az
egyenlet nem alkalmazható.

A modell paraméterezése az irodalomkutatás alapján
történt, amit az 1. táblázat foglal össze.

1. táblázat. Összefoglaló táblázat a talált adatokhoz
Table 1. Summary table for the model parameterization

		Dunaremete	Nagybajcs	Megjegyzés
Mederkítőltő vízhozam, Q_{bf}	[m ³ /s]	4 100	4 100	
Mederszélesség, B_{bf}	[m]	300	420	tervezett
			380	megvalósított
			250	sarkantyúval szűkített
Mederesés, S	[cm/km]	25 - 35	12 - 15	szabályozás után
			< 12	sarkantyúval szűkített
Éves hordalékhozam, Q_b , éves	[t/év]	730 000	484 000	
Mederkítőltő hordalékhozam, Q_b	[kg/s]	43,9	23,8	
Hordalék szemcseméret, D	[mm]	18,3	7,5	

További fontos paraméter még a dimenziómentes mederellenállási tényező (C_f). Értékét Parker 1991-ben publikált összefüggése alapján becsültük (Parker 1991). Az összefüggés a következő:

$$C_z = 8,1 \left(\frac{r_b}{k_s} \right)^{1/6}, \quad (9)$$

ahol C_z a dimenziómentes Chézy ellenállási tényező, r_b a hidraulikus sugár és k_s az érdességmagasság. A dimenziómentes mederellenállási tényező (C_f) és a dimenziómentes Chézy ellenállási tényező (C_z) között az alábbi egyenlet teremt kapcsolatot:

$$C_z = C_f^{-1/2} \quad (10)$$

A hidraulikus sugár (r_b) a vízmélységgel (H) közelíthető (BME 2004). Az érdességmagasság (k_s) Parker és Wong javaslata alapján (Wong és Parker 2006) a következőképp számítható:

$$k_s = 2D_{90}, \text{ ahol} \quad (11)$$

D_{90} az a szemcseméret, aminél a hordalék szemcsék 90%-a kisebb. Értékére pontos adat nem állt rendelkezésre, de az irodalom kutatás alapján (Bogárdi 1955, Tóry 1952) az átlagos és maximális szemátmérők alapján a $D_{90} = 2D_{50}$ összefüggéssel közelítettük.

Modelligazolás

A modelligazolás során azt vizsgáltuk, hogy Dunaremete és Nagybjacs szakaszára a szakirodalomból rendelkezésre álló adatok (Tóry 1952, Bogárdi 1955, Holubová és társai 2004, Holubová és társai 2015, OVF 2020) alapján a modell a valós értékeket számítja-e. Az igazolás során a szakirodalmi adatokkal, illetve az előzőekben bemutatott eljárásokkal paramétereztük a modellt úgy, hogy az ismeretlen paraméterek az U , H , τ^* és S értékek. A kiértékelést a számított és a szakirodalomban publikált esések összevetésével végeztük el, mivel a többi paraméterre vonatkozóan nem állt rendelkezésre valós adat. A két szelvényt az igazolás során külön-külön vizsgáltuk. Nagybjacszon belül két esetet is megvizsgáltunk, mégpedig a 19. századi szabályozásnál tervezett szélességet és a manapság meglévő sarkantyúkkal szűkített szélességet. Dunaremeténél a számolt esés 29,1 cm/km. Az irodalomkutatás során erre a szakaszra 25-35 cm/km-es esést állapítottak meg. A

számított érték épp a megjelölt tartomány közepére esik. A nagybjacsi szelvény esetén az igazolást a két megvalósult esetre vizsgáltuk. A megvalósult folyószabályozás során a mederszélesség 380 m szélesre lett kialakítva. A szakirodalmi adatok alapján (Tóry 1952) ehhez a mederszélességhez 12-15 cm/km-es esés tartozik, amit a modell által számított 12,8-as érték nagyon jól közelít. Később, a sarkantyúkkal való szűkítés hatására kialakuló mederesést a modell 9,8 cm/km-re becsüli. Ez az érték reálisnak értékelhető annak tükrében, hogy ez a szakirodalomban publikált (Tóry 1952) maximális 12 cm/km alá esik. Továbbá, a számított 9,8 cm/km esés ugyancsak jó közelítésnek értékelhető a Gönyű alatti szakaszra mért 8-10 cm/km-es mért eséssel (Tóry 1952) való összevetés alapján.

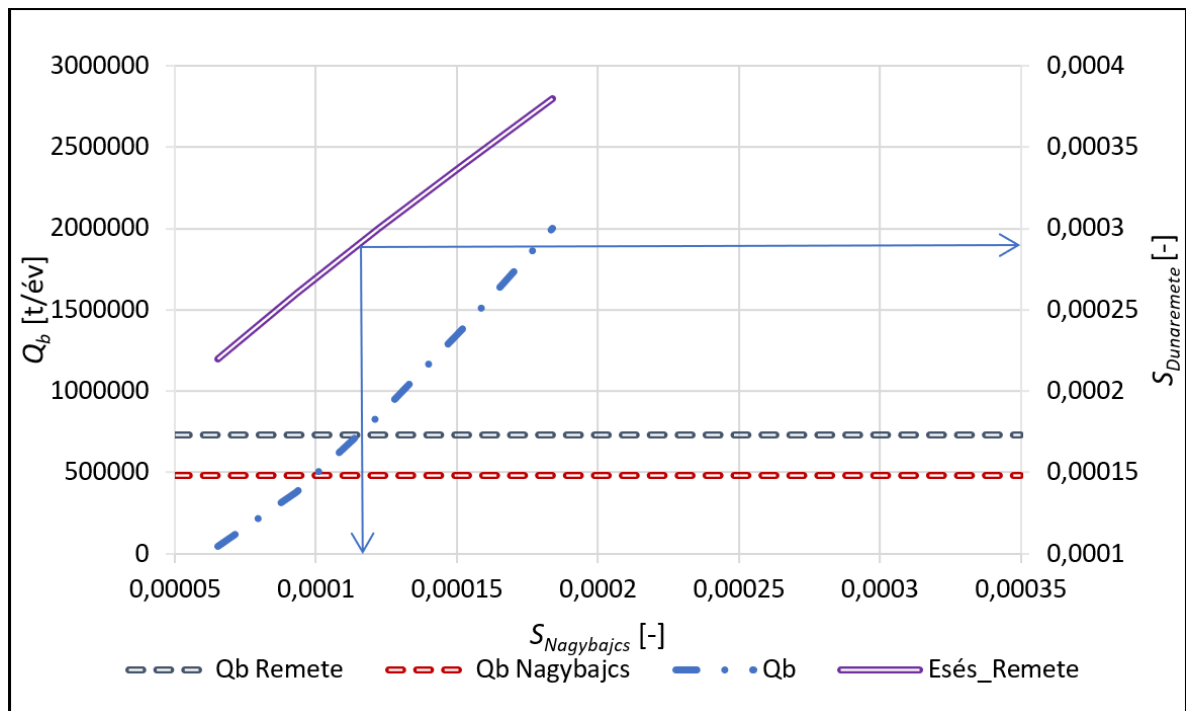
A szabályozás utáni állapotra vonatkozó számított mederesés értékek jól közelítik a mért eséseket. Ezek alapján a modellt igazoltnak értékeltük és alkalmasnak bizonyult további modellvizsgálatok elvégzésére.

EREDMÉNYEK

Egyensúlyi állapotok értékelése

A validált modell alkalmazásával lehetőségessé vált annak vizsgálata, hogy milyen morfológiai állapot esetén állna fenn dinamikus egyensúlyi állapot a Dunaremete és Nagybjacs közötti szakaszon. Abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a dinamikus egyensúlyi állapotban lévő szakaszon belül a hordalékhozam nem változhat. Ennek fényében azt vizsgáltuk, hogy mekkora nagybjacsi és dunaremetei esés kell ahhoz, hogy a hordalékhozamuk megegyezzen.

Az első megközelítés szerint az egyensúlyi állapot eléréséig nem változik a szemcseméret a kiindulási állapothoz képest, vagyis a két szelvény szemcsemérete különbözik (1. táblázat). A 6. ábra mutatja a modell által számított összetartozó morfológiai paraméterek együtteseit. A diagram értelmezése: a pontozott kék vonal segítségével lehet meghatározni, hogy adott éves hordalékhozam esetén (baloldali függőleges tengely) mekkora nagybjacsi esés esetén alakulna ki a dinamikus egyensúlyi állapot. Ezt az esés értéket a lila vonalra vetítve a jobboldali tengely alapján olvasható le a dunaremetei egyensúlyi állapothoz tartozó esés értéke. A 6. ábrán feltüntetésre kerültek a Dunaremetéhez és Nagybjacschoz tartozó éves átlagos hordalékhozam értékek is.

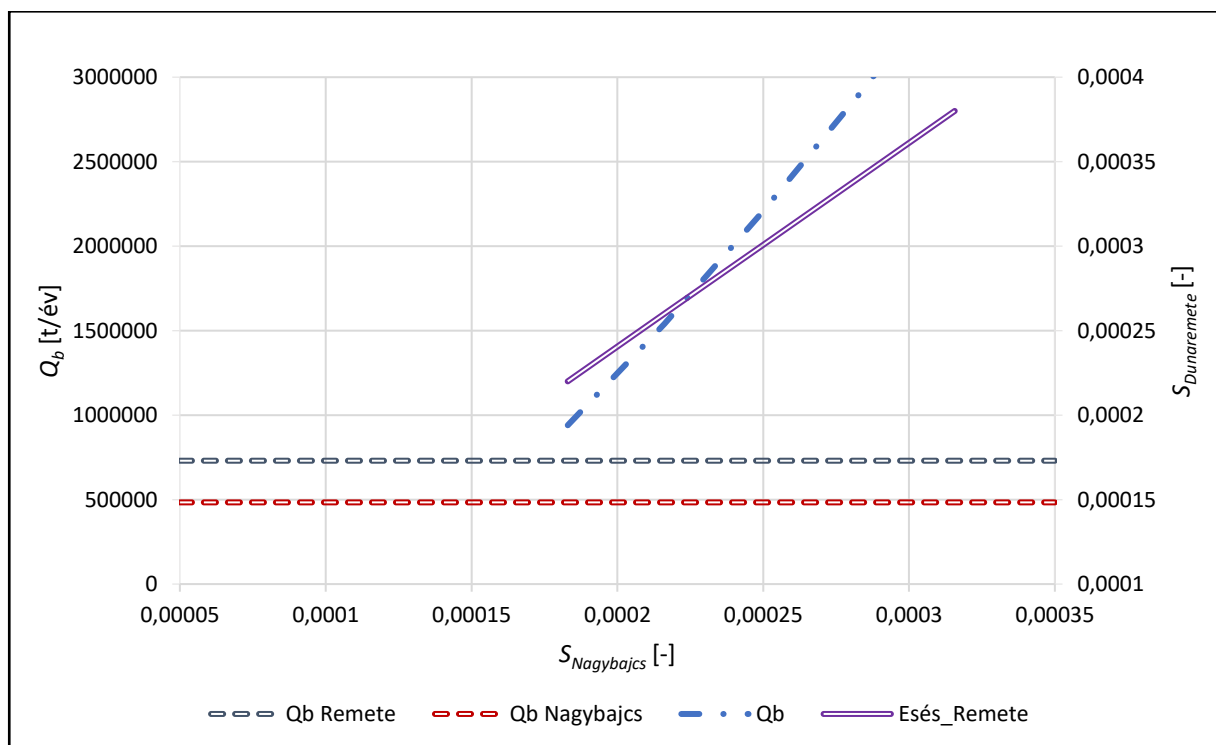


6. ábra. Dinamikus egyensúly számítása szakirodalmi szemcseméretekkel
 Figure 6. Calculation of dynamic equilibrium state with the reported particle sizes

A 6. ábra alapján látható, hogy ha a múltbéli Dunaremeténél mért $\sim 730\,000$ t/év-es hozam a Dunaremete-Nagybajcs szakaszon megegyezne, akkor a nagybajcsi szelvénynél az esésnek alig pár cm/km-t kéne nőnie (a mostani 9,8 cm/km-ről ~ 12 cm/km-re) a dinamikusan egyensúlyi állapot eléréséhez. Ez az eset viszont azt feltételeznél, hogy a szelvényekben a szemcseméret az egyensúlyi álla-

pot eléréséig nem változik, ami több okból (pl. szelektív eróziós folyamat) sem tűnik reálisnak.

Emiatt vizsgáltuk a második esetet, miszerint az egyensúlyi állapotban a két szelvény szemcsemérete megegyezik. Ezek alapján a két szemcseméret átlagát vettük (12,6 mm-es szemcseméret) és azzal végeztük el a számolásokat. Az eredményeket a 7. ábra mutatja be.



7. ábra. Dinamikus egyensúly számítása átlagos szemcsemérettel (12,6 mm)
 Figure 7. Calculation of dynamic equilibrium state with average particle size (12.6 mm)

Az eredmények alapján azt láthatjuk, hogy a Dunaremeténél mért hordalékhozamot nagy eséscsökkenéssel (az eredeti érték közel 70%-a) lehetne biztosítani. Ugyanezt a hozamot megegyező szemcsemérettel Nagybajcsnál az eredeti esés (9,8 cm/km) közel duplája tudná csak elszállítani (kb. 17 cm/km).

Az elvégzett vizsgálat rámutat az 0D megközelítés alkalmazási lehetőségeire, és egyben korlátaira is. A vizsgált szakasz mentén feltehetően nem elhanyagolható a szelektív eróziós folyamat hatása, ami kihat a jellemző szemcseméretre és végső soron az esésváltozásra is. Ilyen jellegű vizsgálathoz már egy 1D leírás szükséges, amit a Dráva folyó esetén is tapasztalunk (Nyiri 2021). Az eredmények alapján azonban az feltételezhető, hogy a vizsgált szakasz dinamikus egyensúlyi állapotánál Dunaremeténél az esés nem csökkenne 20 cm/km alá, valamint Nagybajcsnál ugyanezen érték fölé.

A továbbiakban a validált modell alkalmazási lehetőségeire hozunk példát. Korábbi beavatkozások hatásvizsgálatát végeztük el.

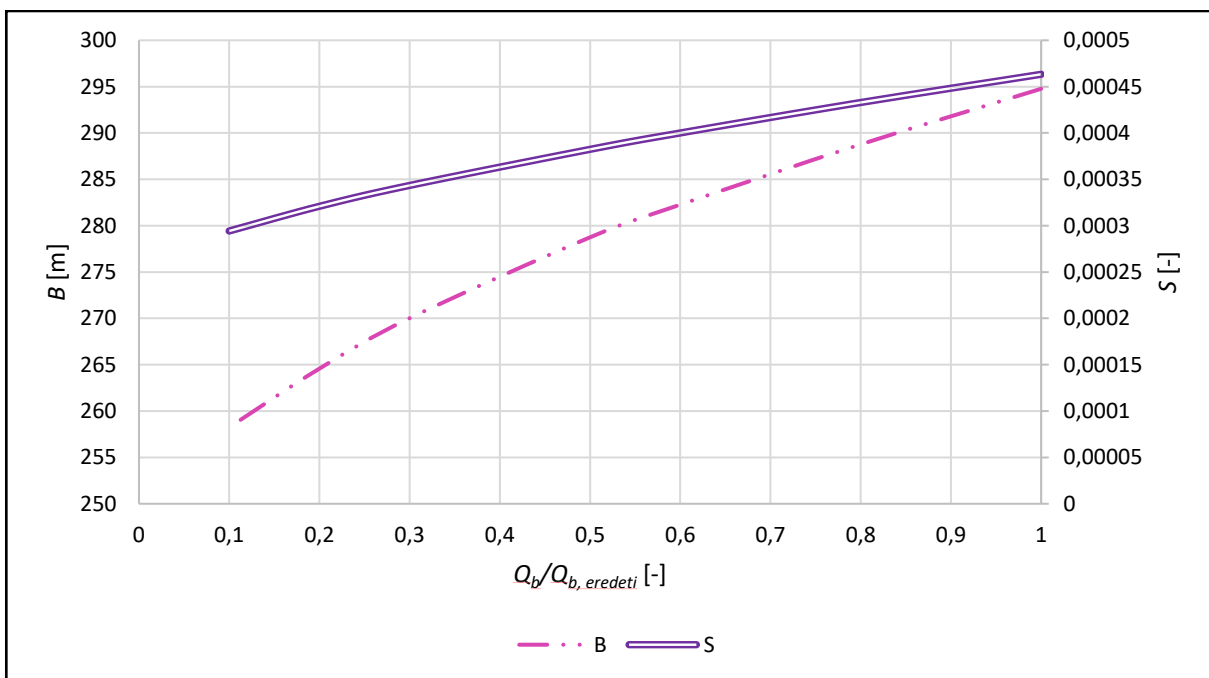
Dunaremetei mederszűkülés vizsgálata

Ebben a vizsgálatban azt néztük, hogy Dunaremetén miként változhatott a meder dinamikus egyensúlyi állapota (szélessége és esése) a korábbi szabályozások révén. Fő kérdés, hogy a bósi vízlépcső üzembe helyezése után, azaz a Duna elterelése milyen új egyensúlyi állapotot eredményezhet a vizsgált szakaszon? Az 1977. évi évkönyvben található az utolsó mederfelvétel, illetve hordalékhozam adat a szakaszra. A beavatkozások hatására azonban ez a szelvény azóta szignifikáns változáson esett át. A 2016-os Vízirajzi Évkönyv szerint az évi maximális vízhozam nem haladta meg az 1 480 m³/s-ot (tehát jócskán lecsökkent a korábbi 4 100 m³/s-os mederkitöltő vízhozam tükrében), továbbá ugyanezen évkönyvből Doborgaz (1839,5 fkm) és Dunaremete (1825,5 fkm) napi vízállás adataiból számolva a vízfelszín esés átlagos értéke 30

cm/km, az esés tehát nem igazán változott (1. táblázat). A hordalékhozamot illetően semmilyen mért, vagy becült adat nem áll rendelkezésre az elterelés utáni időszakból, de joggal feltételezhető, hogy mivel a szelvény a Dunakiliti-duzzasztó (1842,3 fkm) alvizen, attól csupán 16,8 km-re található, ezért az görgetett hordalékban szegény. Továbbá, a meder szélessége is látványosan beszűkült. 1960-ban a meder szélessége elérhette a 300 m is, amely napjainkra körülbelül 170 m-re csökkent (Google Maps 2020). A vizsgálatban a mederkitöltő vízhozamot az elterelés utáni Vízirajzi Évkönyvek adatsorai alapján 1 500 m³/s-nak feltételeztük. Mivel a hordalékhozamot illetően nem állt rendelkezésünkre adat, ezért annak csökkenése okozta hatást (esésben, illetve a meder szélességében) érzékenységvizsgálat segítségével vizsgáltuk.

Az eredeti dunaremetei szemcseméret 18,3 mm volt. Feltételezhető, hogy kisebb vízhozam esetén csökken a csúsztatófeszültség, aminek következtében az éppen stabil szemcse mérete is. Kerestük tehát azt a kritikus szemcseméretet, amit az 1 500 m³/s-os vízhozam pont nem tud mozgásba hozni. Ez a kritikus szemcseméret 13,3 mm-re adódik a modellszámítás alapján. Ez alapján tehát az elterelés előtti szemcseméret esetén nem történne medermozgás, aminek pl. a szelvénytűkülés ellentmond. A jellemző szemcseméret tehát lecsökkent az elterelés óta. A mozgásra képes szemcse mérete kisebb kell legyen a kritikus 13,3 mm-nél, amit 12 mm-re becültünk. A mederszélességet illetően szabadfolyásúnak tekinthető a vízfolyás, ha az az eredeti, feltehetően kőszórással megerősített partfal által kijelölt 300 m-es szélességhez képest nem szélesedik, ekkor ugyanis a folyó szabadon, hordaléklerakás révén csökkentheti a saját mederszélességét.

Két lehetőséget vizsgáltunk. Az első a hordalékcsökkenés hatásának érzékenységvizsgálata, amit a 8. ábra szemléltet. A vizsgált esetben a vízhozam konstans 1 500 m³/s-os értéket vett fel.



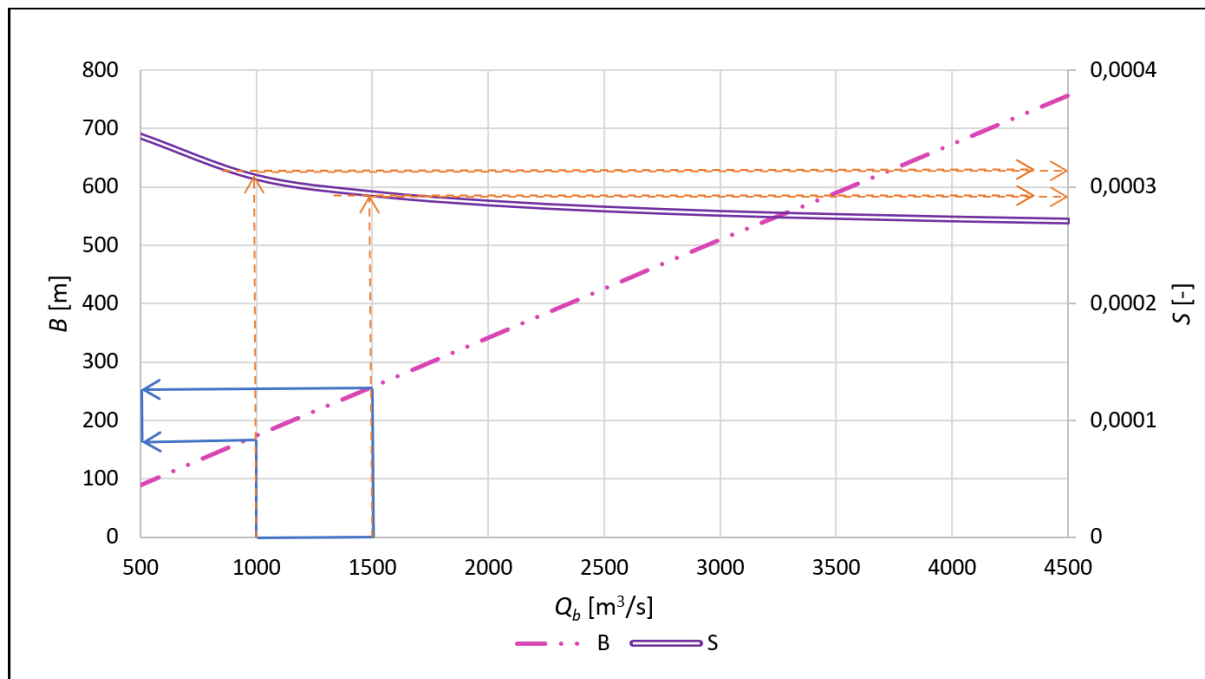
8. ábra. Hordalékhozam csökkenésének hatása a dunaremetei szelvény szélességére
Figure 8. The effect of the decrease of bedload discharge on the width of the Danube at Dunaremete

A bal oldali függőleges tengely a mederszélességet mutatja és a korabeli mederkitöltő vízhozamhoz képest vett vízhozamváltozás függvényében (vízszintes tengely) olvasható le (pontosított lila vonal). A vízhozamváltozás függvényében a lila görbe alapján az egyensúlyi mederesés is leolvasható a jobb oldali függőleges tengelyről.

Az látható, hogy a hordalékhozam-csökkenés hatására a mederszélesség számottevően csökken. Azonban még a

90%-os hordalékcsökkenés is 250 m-t meghaladó szélességet eredményez (a valós érték: ~ 170 m), és 10 cm/km-nél kisebb esést (a valós érték: ~ 30 cm/km). Vagyis, önmagában a hordalékhozam csökkenés nem eredményezheti a napjainkban is tapasztalható medergeometriát.

Második esetben a vízhozamcsökkenés hatását vizsgáltuk, ha a hordalékhozam már egy redukált, 730 607 t/éves értéket vesz fel. Az eredményeket a 9. ábra mutatja:



9. ábra. Vízhóam csökkenésének hatása a dunaremetei szelvény szélességére

Figure 9. The effect of the decrease in flow discharge on the width of the Danube at Dunaremete

Az ábra értelmezése az előző ábrától annyiban tér el, hogy a vízszintes tengelyen nem a hordalékhozam változás, hanem a vízhozam szerepel. Az ábrán látható, hogy 1 000-1 500 m³/s között 150-250 m közötti tartományba adódik a szélesség, amibe a valós 170 m-es szélesség belesik. Ebben a tartományban az esés (lila görbe) alig változik és közel a valós 30 cm/km-es értéket veszi fel.

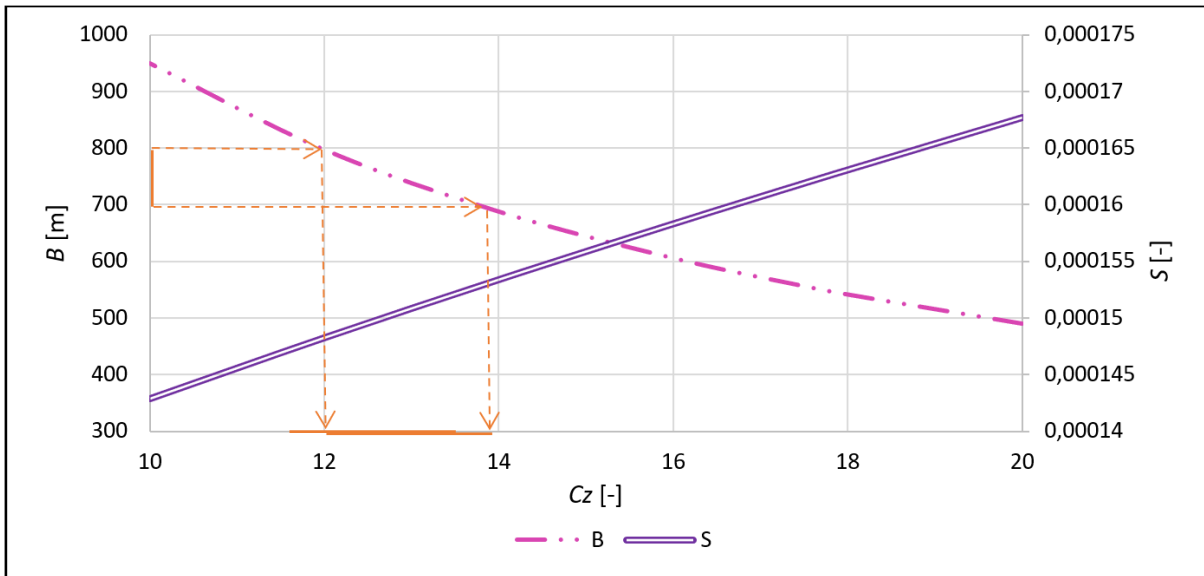
A vizsgálat alapján az mutatható ki, hogy a szelvény-szűkülést a vízhozamcsökkenés és a hordalékhozam csökkenése együttesen okozták, de a vízhozamcsökkenésnek nagyobb szerepe van a változásban. A modellvizsgálat jól példázza a bemutatott modellezési eljárás egy gyakorlati alkalmazhatósági lehetőségét. Ez alapján arra következtethetünk, hogy a vízhozam érdemi változásának hiányában további jelentős szelvény-szűkülés már nem várható, az esés pedig nem mutat érzékenységet a vízhozamváltozásra.

Nagybajcsi szakasz természetes állapotának becslése

Nagybajcsra az előzőekben bemutatott vizsgálatához hasonlóan mesterséges beavatkozások hatásvizsgálatát végeztük el, az esés és a szélesség számítására összpontosítva. A vizsgálat apópióját azonban nem a jelen medergeometria becslése adta, hanem épp ellenkezőleg, azt vizs-

gáltuk, hogy a modellel lehetséges-e múltbéli, szabadfolyású állapot számítása és állapotjellemezése. A Bevezetés című fejezetben az 1. és a 2. ábra alapján látható, hogy a beavatkozásokat megelőzően, a folyó természetes állapotában fonatos alakot öltött a meder, vagyis több sziget és hordalékkúp is megjelent a mederben. A szabadfolyású meder szélessége (~ 7-800 m) jelentősen nagyobb volt a szabályozóhoz képest (~ 380 m), akár a duplája is lehetett. A vizsgálatok során a modellparaméterezésnél ismertett paraméterekből indultunk ki. Mivel a szabályozás előtti állapotban a folyó szabadfolyású volt, ezért a (7) egyenlettel bővített modellváltozatot alkalmaztuk, vagyis a mederszélesség is ismeretlenként jelenik meg. Arra vonatkozóan azonban nem volt számszerű adatunk, hogy a szigetek és hordalékkúpok mekkora többletellenállást eredményezhettek, vagyis C_z értékét – (9) egyenlet – miként vegyük fel, feltételezve, hogy a fonatos árend-szer mederellenállása nagyobb a szabályozott állapoténál. Azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a pusztán mederanyagból számított ellenállást ezek a mederképződmények csak növelhették.

Ezért érzékenységvizsgálatot végeztünk a mederellenállásra. Az eredményeket a 10. ábra mutatja. Bal tengelyen a mederszélesség (szaggatott rózsaszín vonal), jobb tengelyen pedig az esés látható (folytonos lila görbe).



10. ábra. A 19. századi szabályozás előtti állapotok vizsgálata Nagybjacsnál
 Figure 10. Examination of the conditions before the 19th century river regulation at Nagybjacs

A számított eredményeket bemutató ábra alapján az látható, hogy a megvalósított 380 m-es mederszélesség közel dupláját (700-800 m) kijelölő sávban a dimenziómentes Chézy ellenállási tényező ~ 12 -14 értékeket vesz fel. Ez Wong és Parker közleménye alapján (Wong és Parker 2006) reális nagyságrendbe esik, jelentős mennyiségű mederformák esetén. Ekkor az esés 14,5-15,5 cm/km-re becsülhető meg, amely a szakirodalmi adatok alapján reálisnak mondható (Szap alatt 15-20 cm/km közötti esés) (Tóry 1952). Látható az eredmények alapján, hogy a modell képes ezen múltbéli adatok megbecslésére, amelyet szakirodalmakkal igazoltunk.

ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

A folyóvizek medre számos átalakuláson mehet keresztül természetes folyamatok, vagy mesterséges beavatkozások hatására. Szakirodalmi adatok alapján lehetőségünk adódik a korabeli állapotok feltérképezésére és a jelenségek megértésére. Azok alapján következtetni lehet például mesterséges beavatkozások hatására. Az irodalomkutatásunk fő célja azonban nem a vizsgált Duna szakasz állapotértékelése volt, hanem egy dinamikus egyensúlyi állapotot becsülő modell paraméterezéséhez és igazolásához szükséges adatok összegyűjtése. Mivel érdemi adatot Dunaremete és Nagybjacs szelvényére találtunk, ezért ezzel a két szelvényvel, illetve a közöttük lévő 27 km-es szakasszal foglalkoztunk. A vizsgált szelvényeknél nem csak az esésükben volt jelentős különbség, hanem hordalékhozamaikban és szemcseméreteikben is. Mindezek azt mutatják, hogy a két szelvény közötti folyószakasz dinamikus egyensúlya nem állt fenn a vizsgált bősi vízlépcső megépítése előtti 1950-1970 körüli időszakban.

A folyadékra és görgetett hordalékra felírt folytonossági egyenletek, valamint az impulzusegyenlet alapján elkészítettünk egy 0D modellt, ami alatt prizmatikus mederre felírt, permanens egyenletes víz- és hordalékmozgást leíró egyenletrendszer értünk. A bemutatott egyenletrendszeret külföldi szakirodalomból (Parker 2004) vettük át,

ahol ezek az alapegyenletek (további alapegyenlettel kiegészítve) 1D morfordinamikai modellt alkotnak. A modellezéssel célunk a dinamikus egyensúlyi állapot vizsgálata volt. Hazai viszonylatban ilyen morfordinamikai modell felépítésére és alkalmazására nem találtunk példát. Miután az alapegyenleteket ismertettük, a két vizsgált szakaszon alkalmaztuk is őket. A meghatározott paraméterek közül az S esés kiszámított értéke alapján igazoltuk a modellt: mindkét szelvény esetén az irodalomkutatás során talált eséstartományba estek a modellezett értékek.

A modell segítségével a vizsgált szelvények közötti szakasz dinamikus egyensúlyi állapotának feltételeit vizsgáltuk. Kezdetben az esést kerestük Dunaremeténél és Nagybjacsnál is, aminél a hordalékhozamuk egyenlő nagyságúvá válik, vagyis közöttük sem lerakódás, sem pedig erózió nem várható. Ezt a szemcseméret tekintetében két esettel vizsgáltuk: az első esetben heterogén, a másodikban homogén görgetett hordalékot feltételezve a folyószakaszon. Az eredmények alapján azt látjuk, hogy további beavatkozás híján a dinamikus egyensúlyi állapot elérésekor Dunaremeténél nem csökkenne 20 cm/km alá, Nagybjacsnál pedig nem nőne ugyanezen érték fölé az esés. A vizsgálataink azonban az eljárás korlátaira is felhívták a figyelmet: a permanens egyenletes vízmozgás megközelítéssel a hosszirányú változások nem írhatók le az alkalmazott megközelítésben. A vizsgált probléma azonban ezt megköveteli, vagyis legalább permanens fokozatosan változó vízmozgást leíró modell szükséges pontosabb számítás eléréséhez. Továbbá a jelentős szemcseméretben tapasztalható különbség a szelektív eróziós folyamat létét bizonyítja, vagyis vegyes szemösszetételű hordaléktranszport alkalmazása lenne indokolt a jövőben.

A következő vizsgálatban már szabadfolyású mederként vettük számításba a vizsgált szelvényeket, vagyis olyan esetet vettünk számításba, ahol partvédművek nem befolyásolták a mederszélesség alakulását. Ebben az esetben az egyenletrendszer egy újabb egyenlettel tudtuk kibővíteni, így már a szélességet is képes volt számítani a

modell. Ilyen, szabadfolyású folyókra kidolgozott modellre a külföldi szakirodalomban sem találtunk példát.

Először a dunaremetei mederszűkülést vizsgáltuk, ahol napjainkban a Duna elterelése miatt a hordalékhozam és a vízhozam is jelentősen lecsökkent, valamint a mederszélesség is közel 2/3-ára szűkült. A Vízrajzi Évkönyvek alapján becsülni tudtuk a mederkitöltő vízhozam nagyságrendjét (1 000-1 500 m³/s). Eredményeink azt mutatták, hogy a hordalékhozam közel 10%-ára való csökkenése idézhetett elő közel 30%-os, ~100 m-es mederszűkülést. A vizsgálataink alapján arra következtettünk, hogy bár a hordalékhozam és a vízhozam csökkenése együttesen okozták a mederszűkülést, a vízhozamcsökkenés nagyobb szerepet játszott ebben. Ezzel az esettanulmánnyal bemutattuk, hogy az alkalmazott számítási eljárással lehetséges vízlépcsők alvizen az új egyensúlyi medergeometria becslése. Azonban – összhangban az előző vizsgálatainkban tapasztaltakkal – ilyen vizsgálatoknál elengedhetetlen a megbízható mérési adatok megléte. Kritikus paraméterként a megbízható görgetett hordalékhozamra vonatkozó adatokat találtuk.

Második vizsgálatunkban Nagybajcsnál arra voltunk kíváncsiak, hogy ugyanezen kibővített egyenletrendszerrel tudunk-e meghatározni múltbéli jellemzőket. Ebben a részben az érdesség értékén változtatva becsültük a különböző mederszélességeket. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a 19. századi szabályozás előtti, a mostaninál jelentősen szélesebb meder kifejlődésében fontos szerepet játszott a hordaléklerakódás okozta fokozott mederellenállás. A vizsgálattal rámutattunk arra, hogy lehetséges múltbéli állapotok becslése. Segítségével számíthatóvá válhat például árvízszintek folyószabályozások hatására történő változása. Az általunk bemutatott vizsgálatok, illetve egyenletrendszerek használata egy kezdetleges megoldást nyújt arra, hogy a jövőben becsülni lehessen egy folyamnak a természetes változásait, illetve meg tudjuk határozni azt, hogy egy adott műtárgy, vagy beavatkozás miként hat majd a folyó medergeometriájára. Az eljárás segítségével meghatározható a dinamikusan egyensúlyi állapot, vagyis a morfológiai paraméterek közelítő értéke. Terveink szerint a modellel olyan problémák vizsgálhatók a későbbiekben, mint például part menti kavicspadok (pl. a véneki Duna-szakaszon) stabilitása is: amennyiben azok az egyensúlyi szélességhez közelítik a medergeometriát, úgy feltehetően nem csak átmeneti mederformaként jelennek meg.

Kutatásaink során arra jutottunk, hogy a dinamikusan egyensúlyi állapot vizsgálatához elengedhetetlen a megbízható, pontos méréseken alapuló adathalmaz a folyószakasz morfológiai állapotára vonatkozóan. Azon belül is hangsúlyos a mederkitöltő állapotot jellemző adatok megléte, ami felhívja a figyelmet a mederkitöltő vízhozamkor végzett terepi mérések kiemelkedő fontosságára.

A bemutatott vizsgálatok példák arra, hogy OD leírás segítségével milyen módon és pontossággal lehet közelíteni folyószakaszok dinamikusan egyensúlyi állapotát. A vizsgálat Dunaremetére vonatkozóan mára már nem releváns, hiszen a Dunát Dunaremete felett elterelték, ezért a 20. század végére abban a szelvényben jelentősen lecsökkent a hordalék- és vízhozam. A rendelkezésünkre álló

adatok alapján viszont ezen példán keresztül tudtuk igazolni az alkalmazott eljárást, valamint demonstrálni a megközelítés nyújtotta vizsgálati lehetőségeket. Egyúttal felhívjuk a figyelmet a folytonos terepi mérések szükségességére. Hordalékhozam adatok a vizsgált szakasz tekintetében csak kampányszerűen történtek, ami nem ad lehetőséget hasonló vizsgálatok elvégzésére. A vizsgált szakasz alatt, Gönyűnél 2019 óta folytatnak rendszeres hordalékminutavételt, ami hasonló vizsgálatok elvégzését alapozhatja meg.

Kutatási eredményeink arra is rámutatnak, hogy a bemutatott számítási eljárást 1D leírásra (folyásirányban változó) szükséges kibővíteni, a még pontosabb és átfogóbb vizsgálatok érdekében. Ez elengedhetetlen a magyarországi Felső-Duna esetében, ahol a hirtelen eséstörés által előidézett szelektív eróziós folyamat jelentős morfológiai változásokat eredményez. Továbbá, a helyes hordaléktranszport modell megválasztása is sarkalatos. Vegyes szemösszetételű meder esetén a modell pontosságának jelentős javulása várható a görgetett hordalék több frakcióból felépülő keverékének számításba vétele által.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a második szerző esetében a Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának támogatásával, valamint a PD 135037 számú, a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított OTKA posztdoktori kiválósági pályázati program finanszírozásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

Baranya S., Józsa J., Török G.T., Ficsor J., Mohácsiné S.G., Habersack, H., Haimann, M., Riegler, A., Liedermann, M., Hengl, M. (2015). A Duna hordalékvizsgálatai a SEDDON osztrák-magyar együttműködési projekt keretében. Hidrológiai Közöny, 95(1) 41-46.

BME (2004) Hidraulika I. jegyzet. BMEEOVVAT26 segédlet a BME Épmérnöki Kar terem hallgatói részére „Az építész- és az építőmérnök képzés szerkezeti és tartalmi fejlesztése” HEFOP/2004/3.3.1/0001.01.

Bogárdi J. (1955). A hordalékmozgás elmélete. Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó.

Eke, E., Parker, G., Shimizu, Y. (2014). Numerical modeling of erosional and depositional bank processes in migrating river bends with self-formed width: Morphodynamics of bar push and bank pull. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 119(7), 1455-1483.

Ermilov A.A., Baranya S., Fleit G., Török G.T. (2020). Képalapú módszerek fejlesztése folyók morfológiai vizsgálatához, Hidrológiai Közöny, 100/3 74-86.

Google Maps (2020). Online légi felvétel, Google, <https://www.google.hu/maps>.

Holubová, K., Comaj, M., Lukác, M., Mravcová, K., Capeková, Z., Antalová, M. (2015) Final report in DuRe Flood project - 'Danube Floodplain Rehabilitation to Improve Flood Protection and Enhance the Ecological Values of the River in the Stretch between Sap and Szob, Bratislava.

Holubová, K., Capeková, Z., Szolgay, J. (2004). Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River, in River Flow. 59 Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics, 2004(1), 135–142.

Ihrig D. (1973). A magyar vízszabályozás története, Budapest, Országos Vízügyi Hivatal.

Li, C., Czupiga, M.J., Eke, E.C., Viparelli, E., Parker, G. (2015). Variable Shields number model for river bankfull geometry: bankfull shear velocity is viscosity dependent but grain size-independent, Journal of Hydraulic Research, 53(1), 36-48.

Naito, K., Parker, G. (2019). Can Bankfull Discharge and Bankfull Channel Characteristics of an Alluvial Meandering River be Cospecified From a FlowDuration Curve? Journal of Geophysical Research: Earth Surface 124(10), 2381-2401.

Nyiri E. (2021). Folyómedrek egyensúlyi állapotának nagy tér-idő léptékű vizsgálata 1D modellezéssel. TDK dolgozat, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.

Országos Vízügyi Főigazgatóság (2020). Vízrajzi évkönyvek. Vízügyi honlap: <https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=1524>.

Parker, G. (1991). Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. II Applications, Journal of Hydraulic Engineering: 117(2).

Parker, G. (2004). 1D Sediment Transport Morphodynamics with applications To Rivers and Turbidity Currents, e-book, http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm.

Pomázi F., Baranya S., Török G.T. (2020a). Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei 1.-A továbbfejlesztett hordalékmonitoring módszertan bemutatása Hidrológiai Közöny 100(2), 37-47.

Pomázi F., Baranya S. (2020b). Nagy folyók lebegtetett hordalékvándorlásának új vizsgálati módszerei 2. – Közvetlen és közvetett lebegtetett hordalékmérési eljárások összehasonlító vizsgálata Hidrológiai Közöny 100(3) 64-73.

Rákóczi L. (1981). A mederpáncélozódás kutatása a folyószabályozás szolgálatában, VITUKI közlemények 30.

Török G.T., Baranya S. (2017). Morphological Investigation of a Critical Reach of the Upper Hungarian Danube, Period. Polytech. Civ. Eng., 61(4), 752–761.

Török G.T., Józsa J., Baranya S. (2020). A novel sediment transport calculation method based 3D CFD model investigation of a critical Danube reach, Polish Journal of Environmental Studies, 29(4), 2889–2899.

Tőry K. (1952). A Duna és szabályozása, Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó.

Wong, M., Parker, G. (2006). Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database, Journal of Hydraulic Engineering 132(11).

A SZERZŐK



NYIRI EMESE Felsőfokú tanulmányait 2019-ben kezdte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán, melyet jelenleg vízmérnöki specializáción folytat. A Zielinski Szilárd Építőmérnöki Szakkollégium Vízépítő Tagozatának tagozatvezetője. Elnyerte a Fontus vízügyi és környezetvédelmi hallgatói ösztöndíjat (2021).



TÖRÖK GERGELY TIHAMÉR Építőmérnöki oklevelét 2012-ben, PhD fokozatát 2018-ban szerezte meg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg az MTA-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoport, valamint a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének tudományos munkatársa OTKA poszt-doktori kiválósági ösztöndíjasként. Vendégkutatóként kétszer egy-egy szemesztert töltött a norvégiai NTNU egyetemen (2013 és 2015) és egy évet az egyesült államokbeli University of Illinois at Urbana-Champaign-en (2020). Kutatási területe a folyómedrek dinamikus egyensúlyi állapotának numerikus vizsgálata. Elnyerte a Dr. Korányi Imre Ösztöndíjat, Bolyai János Kutatási Ösztöndíjat, a BME-n a Pro Progressio TDK oktatói díjat, valamint a Gábor Dénes Tudományos Diákköri Ösztöndíjat. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2010 óta tagja.