ACTA HYDROLOGICA
SLOVACA

Ročník 16, Tematické číslo, 2015, 114 - 123

HODNOTENIE MORFOLOGICKÉHO VÝVOJA KORYTA DUNAJA NA ÚSEKU SAP - SZOB

Miroslav Lukáč, Katarína Holubová

Súčasný stav Dunaja na úseku Sap – Szob nadväzuje na dlhodobý morfologický vývoj koryta a postupné zmeny, ku ktorým dochádzalo v priebehu stáročí. V rámci bilaterálneho projektu DuReFlood - „Obnova spoločných záplavových území Dunaja pre posilnenie protipovodňovej ochrany a zvýšenie ekologickej hodnoty ekosystému rieky“, bol morfologický vývoj koryta Dunaja hodnotený k časovým horizontom 1992 – 2006, 2006 - 2013, 1992 – 2013 a 2012 – 2013. Analyzované boli zmeny pozdĺžneho profilu koryta vo vzťahu k priebehu smerodajných hladín a tiež objemové zmeny, z ktorých boli identifikované oblasti zanášania a erózie koryta. Pomocou matematického modelu bola zostavená prognóza pravdepodobného morfologického vývoja koryta rieky pre časový horizont 10 rokov. Výsledky hodnotenia poskytli cenné informácie pre návrh revitalizačných opatrení a opatrení zameraných na zníženie povodňového rizika v záujmovej oblasti.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ: morfologický vývoj, koryto rieky, Dunaj, modelovanie

EVALUATION AND MODELLING OF THE DANUBE RIVER CHANNEL MORPHOLOGICAL DEVELOPMENT IN THE SECTION BETWEEN SAP AND SZOB. The present state of the Danube river channel in the section Sap – Szob is connected with long-term morphological development of the river channel and gradual changes, which occurred here in the course of centuries. In the frame of bilateral project DuReFlood - “Danube floodplain rehabilitation to improve flood protection and enhance the ecological values of the river in section between Sap and Szob” Danube river channel morphological development was evaluated in several time horizons: 1992-2006, 2006-2013, 1992-2013 and 2012-2013. Changes in the longitudinal slope of river channel were analyzed in relation to water level changes of characteristic discharges. Changes in the river channel volume helped to identify sections of river erosion/sedimentation. Numerical model of the Danube river channel morphological development provided prognosis of probable river channel evolution in the time horizon of 10 years. Evaluation results provided valuable information for the proposal of restoration measures and measures which focus on the flood risk decrease in the project area.

KEY WORDS: morphological development, river channel, Danube, modelling

Úvod

Hydrologické pomery a súvisiace riečne procesy v daných geologických a geografických podmienkach majú kľúčový význam pre akékoľvek zásahy do toku/inundácie. Pochopenie fungovania riečneho systému v priordzených podmienkach, teda pred realizáciou systematických úprav toku, je východiskom pre návrhy udržateľných vodohospodárskych i revitalizačných opatrení. Prirodzený stav vymedzujú tzv. referenčné podmienky, ktoré reprezentujú posledný neovplyvnený stav rieky. Stupeň hydromorfologickej modifikácie toku je potom vymedzený mierou súčasných zmien vo vzťahu k referenčným podmienkam (implementácia Rámcovej smernice o vode, 2000/60/EC). Posilnením a obnovou prirodzených procesov je možné zmierniť niektoré nepriaznivé dôsledky systematických úprav a zlepšiť ekologický stav toku rešpektujúc obmedzenia dané využívaním vôd (protipovodňová ochrana, plavba, energetika, atď.). V súčasných podmienkach je morfológia toku determinovaná riečnymi procesmi (prietokový režim, dynamika prúdenia a transport sedimentov), ktoré sú pozmenené vplyvom vodohospodárskeho využívania toku. Preto sú poznatky o morfologickom vývoji rieky v strednodo-

bom horizonte i prognóza tohoto vývoja rozhodujúce pre návrhy udržateľných a efektívnych opatrení (napr. protipovodňová ochrana, plavba, revitalizácie). Na základe poznatkov o postupných úpravách Dunaja vo vzťahu k zmenám morfológie je v článku identifikovaný súčasný stav koryta a detailnejšie kvantifikovaný morfologický vývoj koryta v strednodobom horizonte (1992 až 2013). Morfodynamické procesy a prognóza morfologického vývoja Dunaja (10-ročné obdobie) sú posúdené s využitím 1D numerického morfologického v modelu (MIKE 11). Výsledky publikované v článku boli dosiahnuté v rámci projektu HUSK/ 1001/2.1.2/ 0060: "*Obnova spoločných záplavových území Dunaja pre posilnenie protipovodňovej ochrany a zvýšenie ekologickej hodnoty ekosystému rieky"* (DuReFlood) - program cezhraničnej spolupráce Slovensko – Maďarsko 2007-2013 (Holubová a kol., 2015). Za slovenskú stranu sa na riešení projektu podieľali: Výskumný ústav vodného hospodárstva (VÚVH) a Slovenský vodohospodársky podnik (SVP š.p.).

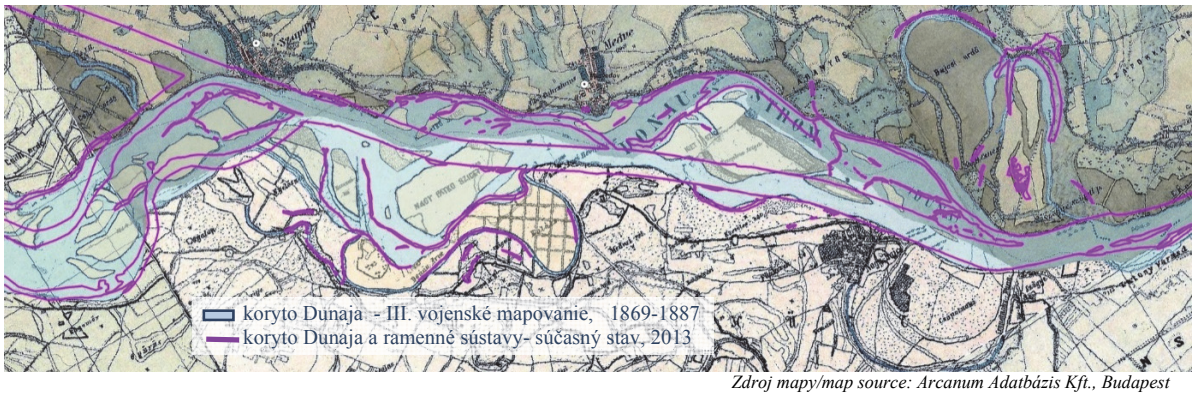
Materiál a metódy

Morfologický vývoj koryta Dunaja vo vzťahu k postupne realizovaným úpravám

V priebehu stáročí sa vplyvom dynamického morfologického vývoja Dunaja v oblasti pod Bratislavou vytváral unikátny anastomózny úsek rieky – rozvetvené koryto s vysokou morfologickou členitosťou - tzv. vnútorná delta Dunaja. Anastomózny charakter toku sa od Medveďova postupne mení na prechodný po Kližskú Nemú. Pod týmto úsekom má rieka charakter nížinného meandrujúceho toku.

Obdobie prevažujúceho "voľného meandrovania" (len miestne úpravy) prevládalo na Dunaji do polovice 19. storočia. Morfologický vývoj Dunaja bol ovplyvňovaný najmä častými povodňami, ktoré vplývali na zmeny polohy i tvaru koryta. Vplyvom dynamického lateralneho vývoja, ktorý v tomto období na Dunaji prevládal, sa v koryte vytváralo množstvo ostrovov a ramien. Ochrana proti povodniam bola spočiatku skôr iba lokálna a chránila najmä najbližšie obce pri Dunaji (do ~13.stor.). Postupne sa systém protipovodňovej ochrany zdokonaľoval, prebudovával, až sa napokon zjednotil do podoby ucelenej protipovodňovej ochrannej línie (do~19. stor.). Takto vzniklo medzihrádzové inundačné územie nepravidelnej šírky, ktorého súčasťou sú aj ramenné sústavy Dunaja. Hrádzové línie koncentrovali povodňové prietoky a veľké vody do medzihrádzového priestoru, ale stredné a malé vody ešte aj v 19. storočí prechádzali týmto územím v nespočetných ramenách.

Rozvoj lodnej dopravy od druhej polovice 19. storočia si vyžadoval vytvorenie jednotného koryta na zabezpečenie plavebnej dráhy. Úpravné práce na Dunaji v oblasti pod Sapom začali v 30-tych rokoch 19. storočia. Nová trasa na mnohých miestach prerezávala vtedajšiu sieť ramien koryta Dunaja, ale interakcia medzi hlavným korytom a ramenami bola vtedy ešte neobmedzená. Za účelom zamedzenia úniku vôd do ramien sa pozdĺž brehových línií postupne budovali brehové stavby- uzávery vtokov do ramien (Szolgay, 1961). Pri neskoršej úprave Dunaja na "malú vodu" sa v koryte vybudovali sústavy výhonov a smerné stavby, ktoré vytvárajú požadované plavebné podmienky počas nízkych prietokov. Laterálny vývoj, ktorý prevažoval na Dunaji až do vytvorenia jednotného koryta, bol touto úpravou úplne zastavený. Stav Dunaja z tohto obdobia možno teda považovať za posledný neovplyvnený-*zodpovedajúci referenčným podmienkam.* Morfologický stav Dunaja v oblasti Sap–Szob do roku 2012 reprezentovalo upravené takmer úplne izolované koryto (inundácia vrátane ramenných sústav) s pozmenenými odtokovými podmienkami. Zmeny riečnych procesov, ktoré sú z hľadiska morfológie koryta kľúčové, sú výsledkom synergického pôsobenia najmä úprav koryta a energetického využitia Dunaja (VD Gabčíkovo, kaskáda vodných stavieb v horných úsekoch Dunaja).



Zdroj mapy/map source: Arcanum Adatbázis Kft., Budapest

Obr. 1. Zmena morfológia koryta Dunaja v oblasti Medveďova na podklade mapy z obdobia 1869 -1887.
Fig. 1. Morphological changes of the Danube river in Medveďov area using map from the period 1869 -1887.

Zhoršujúci sa hydromorfologický stav Dunaja potvrdili aj výsledky Spoločného prieskumu Dunaja –JDS3 (Schwarz, Holubová, Čuban, Matok, Bušovský, 2015) Situácia sa začala zlepšovať po postupnej obnove prietočnosti vybraných dunajských ramien (BROZ, projekt LIFE 07 NAT/SK/000707).

Morfológia koryta Dunaja v strednodobom horizonte

Morfológiu tokov určujú jednak prirodzené podmienky, dané konkrétnym fyzicko-geografickým prostredím, jednak inžinierske zásahy súvisiace s využívaním vôd. Morfologické zmeny koryta a inundácie potom vplývajú na podmienky plavby, úroveň protipovodňovej ochrany či ekologický stav. Súčasný stav Dunaja na úseku Sap–Szob teda nadväzuje na dlhodobý morfologický vývoj koryta a postupné zmeny, ku ktorým dochádzalo v priebehu stáročí. Zmena charakteru Dunaja z podhorského (submontane) na nížinný v oblasti Kližská Nemá – Gönyü (km 1788 – km 1792) je spojená s výraznou zmenou sklonu (z ~0,3% na ~0,05%). Vývoj pozdĺžneho profilu Dunaja pod Kližskou Nemou je ovplyvnený dnovými prahmi na úsekoch: Nyergyesujfalu km 1732–km 1735, Štúrovo – Esztergom km 1721– km 1729, Helenba km 1711, ktoré vytvárajú eróznu bázu a fixujú polohu dna na dolnom okraji sledovaného úseku Dunaja. Za súčasných podmienok je morfológia dna Dunaja determinovaná najmä:

- upraveným korytom so stabilizovanou polohou a brehovým opevnením,
- výhonovými sústavami a smernými stavbami (najmä km 1810 – km 1790),
- deficitom splavenín z horného úseku Dunaja–vplyv záchytnej účinnosti zdrže Hrušov,
- ťažbou dnových sedimentov (bagrovanie dna pre zabezpečenie plavby).

Ku kvantifikácii morfologických zmien koryta boli využité opakované merania priečnych profilov koryta Dunaja (celkove 3440 priečnych profilov) pre obdobia: 1992, 2006, 2013 (údaje SVP, š.p. a Edukovizig, Györ). Morfologické zmeny koryta boli hodnotené k časovým obdobiam 1992–2006, 2006–2013, 1992–2013 jednak ako zmeny pozdĺžneho profilu v najhlbšom mieste v nadväznosti na zmeny priebehu aktualizovanej hladiny nízkej regulačnej a plavebnej vody (HNR-PV´2014), jednak ako zmeny plochy priečnych profilov (objemové zmeny) k hladine HNR PV´96. Zmeny pozdĺžneho profilu vymedzujú základné trendy vývoja pozdĺžneho sklonu dna Dunaja. Oblasti –erózie/+zanášania sú presnejšie kvantifikované objemovými zmenami, ktoré sú vypočítané zo zmien plôch priečnych profilov k danej hladine (HNR PV´96) prenásobením ich vzájomnou vzdialenosťou.

Okrem zmien geometrie koryta sa zásahy do riečneho systému prejavujú aj v zmenách zloženia dnových sedimentov – najmä ich veľkosti a vytriedenosti. K posúdeniu týchto zmien sa využili údaje z odberov dnových sedimentov, ktoré sa vykonali na Dunaji v úseku Sap – ústie Ipľa v období 2004 až 2006 (86 vzoriek) a aktuálne odbery vykonané v priebehu roka 2014 (56 vzoriek), čo umožnilo posúdiť zmeny v zložení dnových sedimentov za takmer 10-ročné obdobie. Všetky odbery sa vykonávali rovnakou metodikou z člna valcovým odberákom v strede koryta a vo vybraných úsekoch aj pri ľavom a pravom brehu Dunaja. Po jednej vzorke sa odobrali sedimenty aj z prítokov (Váh, Hron, Ipeľ). Vysušené vzorky boli spracované sitovou metódou a z výsledkov boli zostavené krivky zrnitosti. Údaje o charakteristických veľkostiach zrn dnových sedimentov sa použili ako doplňujúce informácie k analýze strednodobých morfologických zmien koryta i ako vstupné údaje do jednorozmerného (1D) morfologického numerického modelu.

Modelovanie morfologického vývoja koryta Dunaja medzi Sapom a Szobom

Zostavený numerický model morfologického vývoja koryta Dunaja bol použitý pri analýze hydraulických podmienok, ktoré ovplyvňujú transport sedimentov a na odhad pravdepodobného vývoja koryta Dunaja v blízkej budúcnosti. Modelovou oblasťou bol Dunaj v úseku Sap – Szob (ústie Ipľa, km 1708,50). V prvom kroku bol zostavený hydrodynamický model, ktorý schematizuje prúdenie vody v riešenom úseku pri rôznych hydrologických a hydraulických podmienkach. Po kalibrácii a verifikácii hydrodynamického modelu bol v druhom kroku zostavený model morfologického vývoja koryta Dunaja. Kalibračným obdobím hydrodynamického modelu bolo obdobie rokov 1994-2012. Na verifikáciu modelu pre súčasný stav bolo využité obdobie roku 2013. Hydrodynamický model, kalibrovaný a verifikovaný v širokom rozsahu prietokových situácií, predstavoval spoľahlivý a aktuálny základ pre aplikáciu morfologického modelu.

V aplikovanom softvéri dánskej spoločnosti DHI Water & Environment MIKE 11 má užívateľ možnosť voľby medzi viacerými teoreticko-experimentálnymi modelmi (vzťahmi) pre výpočet transportu sedimentov. Na základe predchádzajúcich skúseností VÚVH z priamych meraní transportu sedimentov (Lukáč, Holubová, Szolgay, 2002) i z modelovania týchto procesov na Dunaji (Holubová, Capeková, Lukáč, 2006) boli pri testovacích výpočtoch použité vzťahy Engelunda a Hansena, Ackersa a Whitea, Meyer-Petera a Műllera a tiež vzťah Sata, Kikkawu a Ashidu. Tieto vzťahy sa vyznačujú pomerne vysokou citlivosťou na hodnoty reprezentatívnej veľkosti splavenín, ktoré sú jedným zo základných vstupných údajov v morfologickom modeli. Vplyvom zrnitosti splavenín Dunaja na výsledky výpočtov transportu splavenín sa detailnejšie zaoberá práca Camenen, Holubová, Lukáč, Le Coz, Paquier (2011). V morfologickom modeli sa použili údaje z kriviek zrnitosti dnových sedimentov, ktoré sa získali v rámci detailného prieskumu zloženia dna Dunaja (2004-2006, 2014).

Výsledky testovacích výpočtov boli porovnané s výsledkami priamych meraní transportu splavenín, ktoré vykonali pracovníci VÚVH v oblasti pod Sapom (km 1795,580) v rokoch 2000-2002. Celoprofilové merania švajčiarskym sieťovým lapákom splavenín sa uskutočnili 71-krát, pri prietokoch v rozpätí Q=972 až 4745 $m^3.s^{-1}$, čo predstavuje dostatočne reprezentatívnu vzorku pre analýzu transportu sedimentov (Holubová, Capeková, Szolgay, 2004). Z porovnania vyplynulo, že k výsledkom priamych terénnych meraní sú najbližšie modelové výsledky za predpokladu použitia vzťahu Sata, Kikkawu a Ashidu (SKA). Preto sa v numerickom morfologickom modeli využil práve tento vzťah.

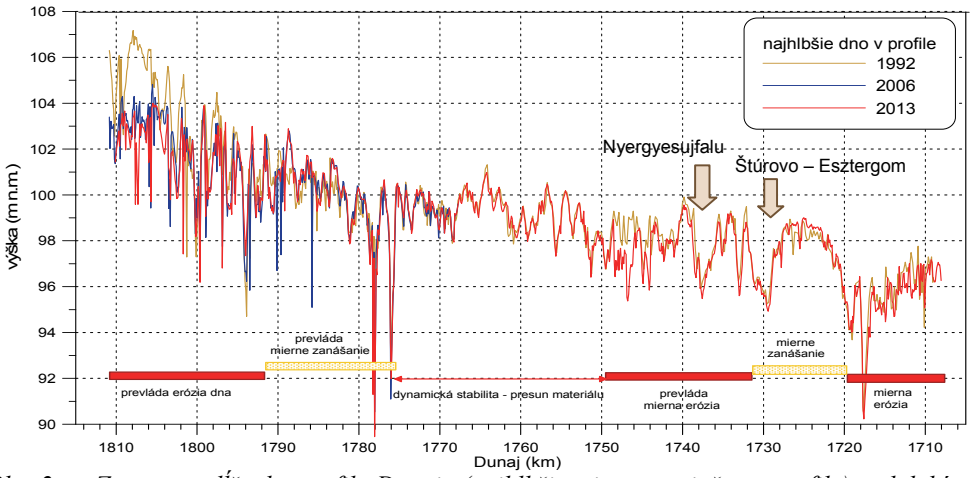
Výsledky a diskusia

Morfologický vývoj koryta Dunaja a kvantifikácia zmien dna v strednodobom horizonte

Priebeh pozdĺžneho profilu dna Dunaja (najhlbšie miesto v profile) pre obdobia 1992, 2006 a 2013 jasne preukazuje, že najdynamickejšie zmeny dna Dunaja nastali v prvých 10-tich rokoch po uvedení VD Gabčíkovo do prevádzky (obr.2). Dno Dunaja sa v tomto období výrazne prehlbovalo (4-5 m, lokálne až do 7 m) a degradácia sa posúvala v smere po prúde až ku km 1792. Výrazný pokles dna v tejto oblasti je podmienený najmä deficitom splavenín v dôsledku záchytnej účinnosti zdrže Hrušov. Časť erodovaných sedimentov sa usadzovala za týmto úsekom až po km 1776, kde sa vytvárajú oblasti s pomerne mohutnými nánosmi (km 1778). V tejto oblasti sa v dvoch lokalitách (km 1778, km 1776) opakovane objavuje aj extrémny pokles dna 8 až 9 metrov (obr.2), ktorý pravdepodobne súvisí s lokálnym bagrovaním pre potreby úpravy plavebnej dráhy v oblasti, kde dochádza k zanášaniu koryta Dunaja (pod Zlatnou na Ostrove). Nadväzujúci úsek až po km 1750 sa dlhodobo nachádza v stave dynamickej stability– tzn. zmeny morfológie dna sú iba mierne, ovplyvnené prevažne lokálnym presunom sedimentov s charakteristickým striedaním oblastí miernej erózie a zanášania. V smere po prúde sa striedajú úseky s miernou eróziou a s miernym zanášaním. I keď pozdĺžny profil v najhlbšom mieste profilu naznačuje výraznejší pokles dna v oblasti km 1746 až 1749, detailnejšia analýza objemových zmien koryta (vychádzajúca z priečnych profilov) tento vývoj nepotvrdila.

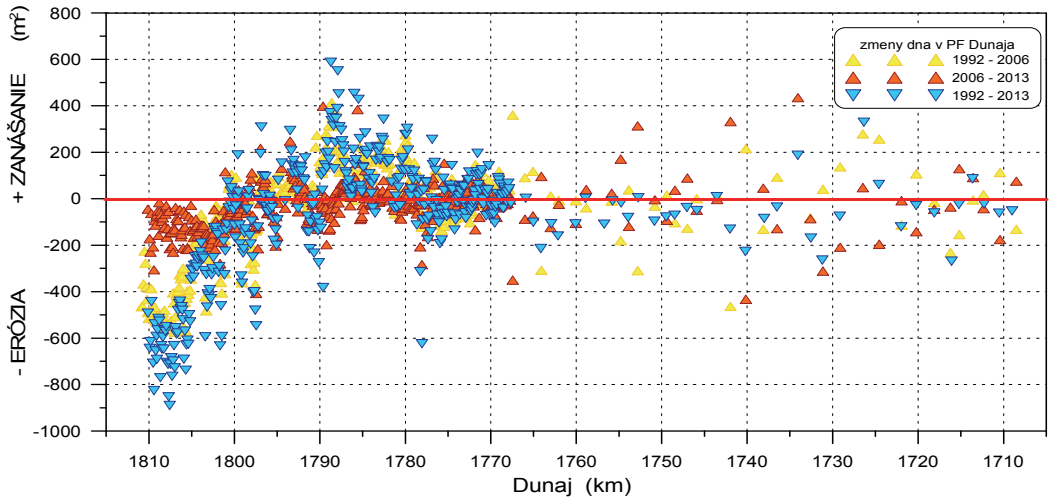
Vplyvom degradácie dna Dunaja dochádza k poklesu hladiny HNR-PV, ktorý sa najvýraznejšie prejavuje na úseku od Sapu po km 1804. Pokračujúce prehlbovanie dna až po Kližskú Nemú už túto hladinu významnejšie neovplyvňuje. Za obdobie od roku 1990 do 2013 je maximálny pokles HNR-PV´2013 v oblasti Sapu až 2 metre (Holubová a kol., 2015). I keď sa dynamika morfologických zmien za posledné roky zmierňuje, proces degradácie dna ešte stále pokračuje. Priebeh súčasného dna Dunaja (2013) naznačuje pokračujúce znižovanie sklonu dna v hornom dynamickejšom úseku (Sap – Kližská Nemá) a jeho postupné vyrovnávanie s výrazne nižším sklonom pod Kližskou Nemou. Táto situácia môže mať nepriaznivý vplyv na plavebné pomery (častejšie vytváranie brodových úsekov) i odtok veľkých vôd. Zmeny objemu sedimentov, ktoré sú vypočítané pre obdobia 1992–2006, 2006–2013, 1992–2013 (Tab. 1) sledujú základné trendy procesov erózie a zanášania koryta Dunaja, ktoré vymedzujú zmeny pozdĺžneho profilu (obr.2).

Analýza zmien priečnych profilov umožňuje presnejšiu identifikáciu oblastí erózie/zanášania a najmä kvantifikáciu objemu sedimentov. Vzhľadom k tomu, že najdynamickejšie zmeny dna Dunaja sú na úseku Sap – Komárno, sústredíme sa ďalej na výsledky, ktoré sme získali pre dve morfologicky odlišné oblasti: km 1810 až km 1790 (dynamická oblasť s prevládajúcou eróziou) a km 1790 až 1770 (oblasť s nižšou dynamikou, kde prevláda zanášanie).



Obr. 2. Zmeny pozdĺžneho profilu Dunaja (najhlbšie miesto v priečnom profile) v období 1992–2006–2013.

Fig. 2. Changes in the longitudinal profile of the Danube (deepest point in cross section) in 1992–2006–2013.



Obr. 3. Morfologické zmeny dna Dunaja v priečnych profiloch v období 1992-2006-2013.
Fig. 3. Morphological changes of the Danube bottom in cross-section profiles in 1992-2006-2013.

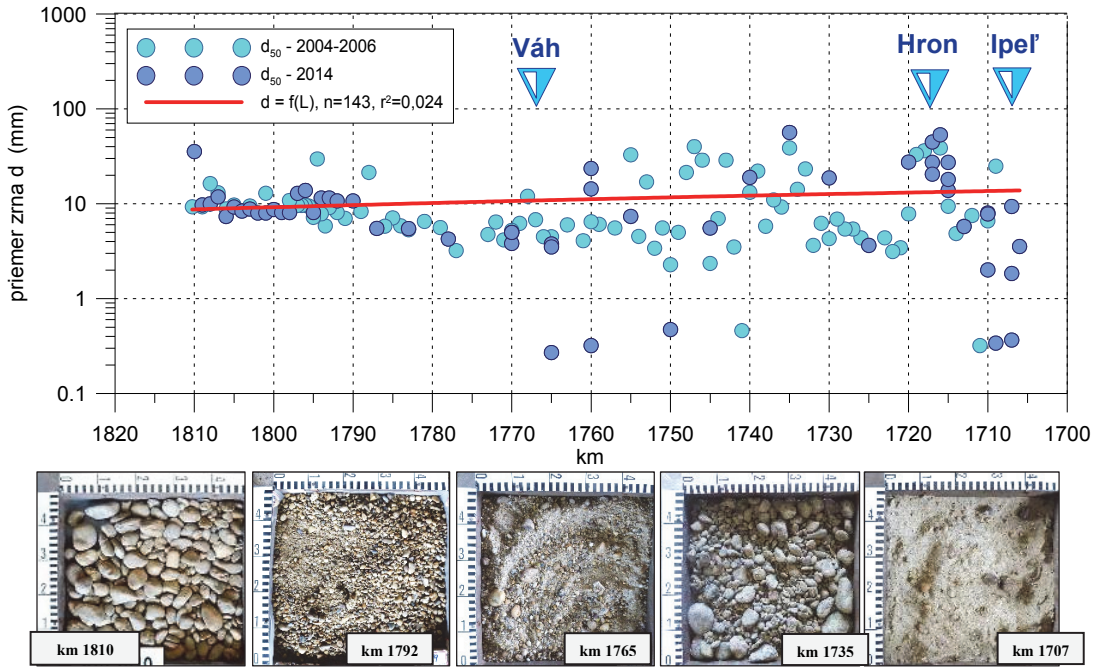
Tabuľka 1. Objemy erózie a zanášania koryta Dunaja v oblasti Sap - Komárno
Table 1. Erosion and sedimentation volumes for the Danube river between Sap and Komarno

obdobie/úsek	km 1810 – km 1790		km 1790 – km 1770	
	erózia (m^3)	zanášanie (m^3)	erózia (m^3)	zanášanie (m^3)
1992 – 2006	- 3 516 671	+ 460 717	- 188 285	+ 1 811 477
2006 – 2013	- 1 672 980	+ 310 640	- 429 764	+ 336 826
1992 – 2013	**- 5 189 651**	**+ 771 357**	**- 618 049**	**+ 2 148 303**

Objem erodovaných sedimentov v oblasti km 1810 – km 1790 je - 4,43 mil.m^3 a objem zanášania na úseku km 1790 – km 1770 je + 1,53 mil.m^3 za celé sledované obdobie 1992 až 2013. Na celom úseku km 1810 až 1770 je deficit sedimentov ~ 2,9 mil.m^3 čo sa približne rovná objemu vybagrovaných sedimentov (3,3 mil.m^3). Na oboch úsekoch dochádza k postupnému zmenšovaniu objemov zanášania aj vymieľania, čo potvrdzuje znižovanie morfodynamických procesov v tomto úseku.

Nadmerné ťažba dnových sedimentov podporuje poprúdovú a protiprúdovu degradáciu riečneho dna, čo nepriaznivo vplýva na morfologický vývoj tokov. Nepriaznivý vplyv bagrovania sa prejaví, ak sú ročné objemy vyťažených sedimentov vyššie ako je transportná kapacita Dunaja v danom úseku (~250,000 m^3 úsek Sap –Kližská Nemá, nadväzujúci úsek po Szob ~120,000 m^3). V oblastiach ovplyvnených výraznejším poklesom dna by sa bagrovať nemalo vôbec. Podklady o vyťažených sedimentoch v konkrétnych lokalitách Dunaja za obdobie rokov 1992 – 2013 na úseku Sap – Szob (SVP š. p., Eduvizig Györ) naznačujú od roku 2003 pozitívny trend znižovania ročných objemov vyťažených sedimentov, pričom v oblasti výrazného poklesu dna sa bagrovalo len minimálne (Holubová a kol., 2015).

Fyzikálne vlastnosti dnových sedimentov Dunaja- vyjadrené priebehom kriviek zrnitosti (strmosť krivky) poskytujú veľmi cenné informácie pre hodnotenie stavu koryta a miery narušenia prirodzených riečnych procesov. Krivky zrnitosti sú aj nevyhnutným podkladom pre numerické modelovanie morfologických zmien koryta. Dnový materiál Dunaja pozostáva z jemnozrnného až hrubozrnného štrku. Hodnoty veľkosti stredného zrna d_{50} porovnané pre dve obdobia odberov 2002-2004 a 2014 naznačujú, že za ~10 rokov nenastali v zložení dna Dunaja v sledovanom úseku žiadne významnejšie zmeny. Priebeh hodnôt d_{50} v danom úseku však jasne poukazuje na oblasti, kde sa tieto hodnoty výraznejšie líšia (obr.4). Na prvom úseku Sap-Kližská Nemá je dnový materiál značne pretriedený, čo naznačuje takmer jednotná veľkosť stredného zrna d_{50}~10 mm. Je to oblasť s najdynamickejšími morfologickými zmenami. V nadväzujúcom úseku Kližská Nemá - Komárno je situácia veľmi podobná, avšak veľkosť zrna je mierne nižšia d_{50}~5 mm. Značná vytriedenosť dnového materiálu a nízka variabilita hodnôt stredného zrna dokumentuje vplyv deficitu splavenín a účinok objektov v koryte (obojstranné sústavy výhonov) na kompozíciu dna Dunaja. Na úseku Komárno – Szob je už variabilita veľkosti dnových sedimentov podstatne vyššia a viac zodpovedá prirodzeným podmienkam. Na zloženie



Obr. 4. Vzorky dnových sedimentov a hodnoty stredného zrna (d_{50}) pozdĺž sledovaného úseku Dunaja.
Fig. 4. Bed material smaples and values of medium grain size (D_{50}) along investigated section of the Danube.

dnového materiálu Dunaja vplývajú aj ľavostranné prítoky Váh, Hron a Ipeľ. Váh a Ipeľ prinášajú do Dunaja väčšie množstvo jemnozrnných sedimentov – (piesok, prach) a Hron hrubozrnnejší štrk.
Podľa Sternbergovho zákona obrusu dnových sedimentov (Sternberg, 1875) sa priemer zŕn dnového materiálu v smere po prúde zmenšuje. Táto zákonitosť platí na prirodzených alebo len mierne narušených tokoch. Závislosť zmenšovania zrna so vzdialenosťou sa na sledovanom úseku Dunaja neprejavila (obr.4) – naopak, veľkosť zrna v smere po prúde sa mierne zväčšuje, čo je spôsobené vyššou mierou narušenia riečnych procesov.

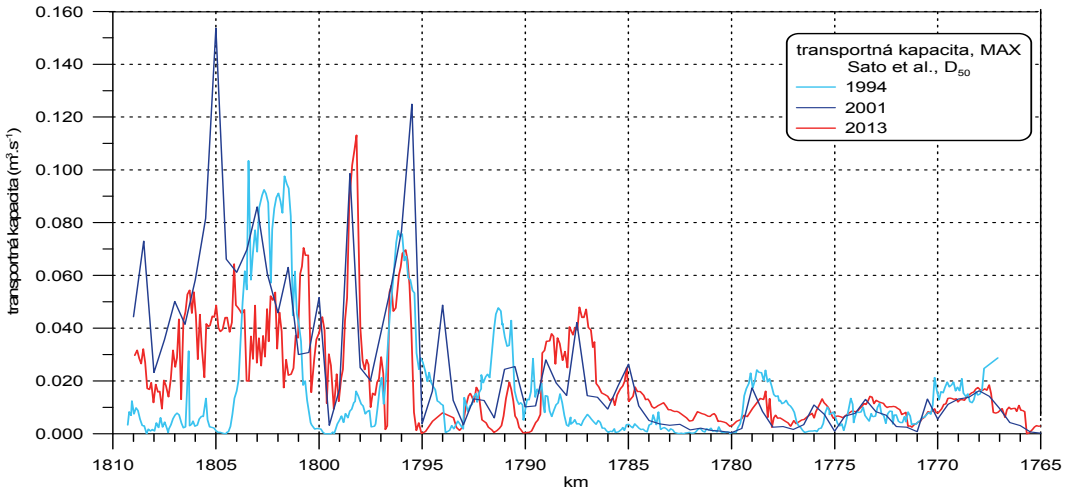
Morfodynamika a prognóza vývoja

Z analýzy terénnych meraní a morfologického vývoja koryta Dunaja vyplýva, že najvyššiu dynamiku tento proces dosiahol na úseku medzi km 1809 a 1785. Tu sa nachádzajú rozsiahle sústavy smerných stavieb – výhonov, ktoré výrazne ovplyvňujú morfologický vývoj koryta Dunaja. Pod ústím Váhu do Dunaja sa teoretický simulovaný transport sedimentov postupne zmenšoval podľa každého modelového vzťahu. Nulové hodnoty boli simulované na úseku km 1747,800-1727,200 a tiež na úseku pod km 1720,800. Najintenzívnejší transport sedimentov v prvých rokoch prevádzky VDG podľa vzťahu SKA, s maximálnymi hodnotami do 0,105 m^3s^{-1}, sa koncentroval v úseku km 1804-1801,5 pod mostom v Medveďove (obr. 5). Ďalšie lokálne maximá pre časovú úroveň roku 1994 boli modelom simulované v okolí km 1796,2 (prietok sedimentov Q_{ST}=0,076 $m^3.s^{-1}$) a km 1791,3 (Q_{ST}=0,047 $m^3.s^{-1}$).
Ďalej sa transport sedimentov zmenšuje, hodnoty väčšie ako 0,01 $m^3.s^{-1}$ boli simulované v oblasti km 1777,1-1779,5 a v okolí Komárna (pod km 1770,2). Pre topografiu modelu z roku 2001 sú simulované maximá prietoku sedimentov väčšie v porovnaní s referenčným stavom (1994) takmer na celom úseku medzi Sapom a ústím Mošonského Dunaja. Maximálna hodnota Q_{ST}=0,154 $m^3.s^{-1}$ bola simulovaná v km 1805. Najvýraznejšie rozdiely v transportnej kapacite (miestami až rádové) sú v úseku km 1809-1804 a evidentné sú opäť rozdiely pri porovnaní úsekov nad a pod Mošonským Dunajom. Pre súčasný stav (topografia modelu 2013) možno konštatovať, že prietok sedimentov je nad Mošonským Dunajom väčšinou menší ako v roku 2001. Maximálna hodnota bola modelom simulovaná v km 1798,2. K nárastu transportnej kapacity (porovnanie 1994, 2001) došlo hlavne v úseku km 1789-1780. Pod km 1780 po ústie Váhu sú rozdiely medzi tromi porovnávanými časovými úrovňami menej výrazné.
Jedným z dôsledkov erózie dna je zmenšenie pozdĺžneho sklonu koryta Dunaja, ktorý vplýva aj na intenzitu transportu sedimentov. Rýchlosť prúdenia vody a šmykové (tangenciálne) napätie pri dne sú ďalšie kľúčové hydraulické veličiny, ktoré ovplyvňujú transport sedi-

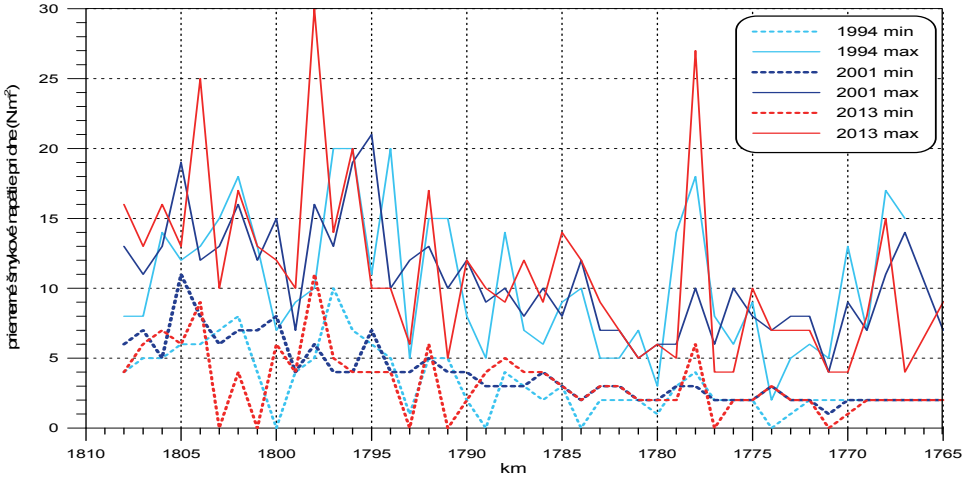
mentov. Keďže bol pri simuláciách použitý jednorozmerný numerický model, výsledkom simulácií sú priemerné hodnoty týchto veličín v jednotlivých výpočtových bodoch modelu, ktoré predstavujú priečne profily koryta a inundácií Dunaja (celkovo 935 priečnych profilov). Výsledky modelových simulácií umožnili identifikáciu časových zmien hydraulických podmienok, ktoré ovplyvňujú transport sedimentov a kvantifikovanie tohto procesu. Maximá simulovaných priemerných profilových rýchlostí sa v porovnaní s referenčným stavom (1994) pomerne výrazne zmenšili na úseku medzi Sapom a ústím Mošonského Dunaja (km 1794), čo je dôsledkom vyrovnávania sa pozdĺžneho sklonu dna koryta Dunaja. V smere ďalej po prúde sú rozdiely (pokles priemerných profilových rýchlostí prúdenia vody) voči referenčnému stavu väčšie ako 0,15 $m.s^{-1}$ medzi km 1785 a 1777 a tiež medzi km 1742 a 1727. Najväčšie hodnoty priemerných profilových rýchlostí (viac ako 2 $m.s^{-1}$), boli modelom simulované v oblasti Komárna (km 1767-1770), kde je prúdenie vody koncentrované do zúženého koryta Dunaja v intraviláne.

Zmeny rýchlostí prúdenia vody mali vplyv aj na zmeny hodnôt šmykového napätia pri dne (obr. 6). Na úseku medzi Sapom a km 1798 prevláda tendencia zvýšenia hodnôt šmykového napätia pri dne v porovnaní s referenčným stavom a pozdĺžne profily odzrkadľujú dynamický morfologický vývoj koryta Dunaja po uvedení VDG do prevádzky. Výrazné lokálne maximá s hodnotami $\tau \geq 20$ $N.m^{-2}$ boli pre súčasný stav modelom simulované v km 1804, 1798 a 1778. Pod Komárnom simulované hodnoty presiahli 10 $N.m^{-2}$ len ojedinele, v okolí km 1760. Úsek Dunaja medzi Sapom a ústím Mošonského Dunaja sa vyznačoval najväčšími morfologickými zmenami.

Rozsiahle sústavy výhonov a miestne sklonové pomery



Obr. 5. Maximálne modelom simulované hodnoty transportnej kapacity pre rôzne časové úrovne.
Fig. 5. Maximum sediment transport capacity simulated with model in different time horizons.



Obr. 6. Rozpätie modelom simulovaných hodnôt priemerného šmykového napätia pri dne.
Fig. 6. Range of average bed shear stress values simulated with model.

tu prispeli ku koncentrácii prúdenia vody, vytriedeniu dnového materiálu a intenzívnemu transportu sedimentov, ktorý podľa modelových simulácií začína už pri nízkych prietokoch (aj menej ako 1000 $m^3.s^{-1}$). Pre súčasný stav je transportná kapacita najväčšia (porovnanie s referenčným stavom 1994 a rokom 2001) v km 1808, 1804, 1798 a 1797. Úsek km 1793-1790 možno označiť ako prechodový. Vzťah medzi transportnou kapacitou a prietokom vody nie je jednoznačný a v čase sa značne mení. V úseku km 1789-1780 (s výnimkou km 1785) je transportná kapacita opäť najväčšia pre súčasný stav. Nasleduje kratší prechodový úsek km 1779-1776. Na 10 km dlhom úseku Dunaja medzi km 1775 a 1765 sa transportná kapacita voči referenčnému stavu i voči časovej úrovni 2001 väčšinou výrazne zvýšila. Medzi Komárnom a Štúrovom je simulovaná transportná kapacita pre súčasný stav podľa vzťahu SKA nulová lokálne, aj na dlhších parciálnych úsekoch (km 1762-1758, 1742-1727, 1721-1718,5).

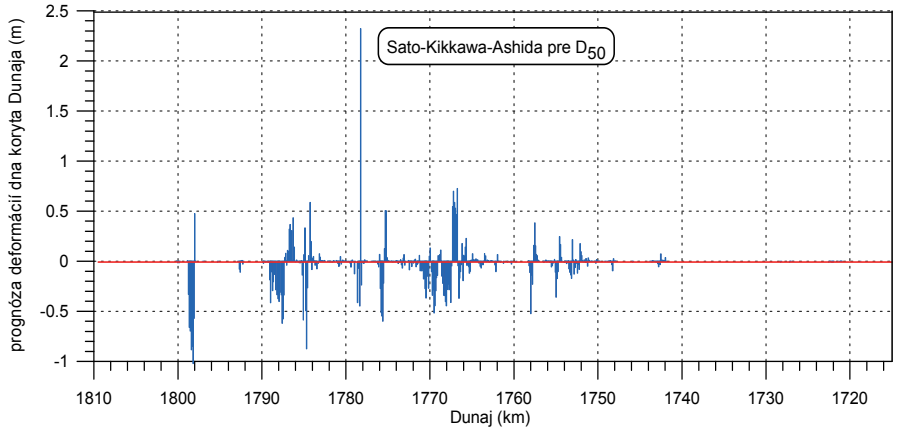
Zmenené hydraulické podmienky sa tu prejavili výrazným zvýšením transportnej kapacity pre súčasný stav v porovnaní s časovou úrovňou 2001 najmä medzi km 1755 a 1745. S modelom schematizujúcim súčasný stav sme simulovali pravdepodobný morfologický vývoj koryta Dunaja pre časový horizont 10 rokov (obr.7). Prevládajúcim procesom je mierna erózia dna, ktorá však presiahla 1 m len v km 1798,190. Koncentruje sa hlavne v úsekoch km 1798,8-1798,1, km 1789,1-1787,3, km 1785,2-1784,5, km 1775,9-1775,5 a najmä km 1770,8-1767,5 - nad mostom v Komárne. V tejto oblasti predpokladali eróziu dna aj staršie prognózy (Holubová, Lukáč, 2009), no zatiaľ sa naplnili len čiastočne. Pod ústím Váhu sa intenzita prognózovaných deformácií koryta postupne utlmuje, zmeny nepresahujú ±5 cm. Zanášanie koryta, zriedka presahujúce 0,5 m bolo prognózované len lokálne, s najväčšou hodnotou 2,3 m v km 1778,240. Najvýraznejší úsek súvislého zanášania bol modelom prognózovaný medzi km 1767,3-1765,6 – od mostu v Komárne po ústie Váhu. Všeobecne možno konštatovať, že prognóza predpokladá zníženú intenzitu morfologických zmien koryta Dunaja v blízkej budúcnosti, čo korešponduje so skôr predpovedaným trendom súvisiacim s vyrovnávaním sa pozdĺžneho sklonu koryta.

Záver

Poznatky o morfológii toku a súvisiacich riečnych procesoch z obdobia prirodzeného vývoja sú potrebné k pochopeniu ich súčasného fungovania, ktoré je často obmedzené vodohospodárskym využívaním. Hodnotenie morfologického vývoja Dunaja na úseku Sap – Szob pre obdobie 1992 až 2013, ktoré sa vykonalo s využitím historických podkladov a aktuálnych údajov (topografických, hydraulických, morfologických, technických) a tiež nástrojov numerického modelovania (MIKE 11) prinieslo veľa aktuálnych poznatkov.

Analýza vývoja morfológie koryta na základe posúdenia zmien pozdĺžneho profilu a kvantifikácie objemov erózie/zanášania pozdĺž sledovaného úseku Dunaja dna poukázala na dva základné trendy: zmierňovanie intenzity procesov erózie/zanášania a postupné vyrovnávanie pozdĺžneho sklonu dna Dunaja, čo potvrdili aj výsledky morfologického modelovania. Prognóza vývoja dna (morfologický model) naznačuje, že proces degradácie dna bude pokračovať aj v nasledujúcich rokoch. To môže mať nepriaznivý vplyv na plavebné pomery (častejšie vytváranie brodových úsekov) i odtok veľkých vôd. Získané poznatkov o aktuálnom morfologickom vývoji dna Dunaja a jeho prognóze vytvárajú predpoklady pre návrhy udržateľných a efektívnych opatrení, ktoré by mohli niektoré nepriaznivé účinky úpravy zmierniť.

Vytvorené numerické modely (hydrodynamický a morfologický) boli zostavené s využitím aktuálnych topografických údajov a kalibrované značným rozsahom



Obr. 7. Modelom prognózované deformácie dna koryta Dunaja pre časový horizont 10 rokov (2024).

Fig. 7. Danube river bed deformations – model prediction for the time horizon of 10 years (2024).

priamo meraných údajov (hladiny, rýchlosti prúdenia vody, prietoky, transport sedimentov) preto je možné tieto modely využívať na posúdenie účinnosti akýchkoľvek ďalších vodohospodárskych a ekologických opatrení plánovaných na Dunaji pre potreby správcu toku (SVP, š.p.) i bilaterálnej slovensko-maďarskej Komisie pre hraničné vody. Pravidelná aktualizácia zostavených modelov umožní ich vyžitie aj v budúcnosti.

Poďakovanie

Publikované výsledky boli získané v rámci projektu cezhraničnej spolupráce Slovensko – Maďarsko HUSK/ 1001/2.1.2/0060, ktorý bol finančne podporovaného Európskou komisiou a MPRV SR.

Literatúra

Biszak, S., Timár, G., Molnár, G., Jankó, A. 2007. The Third Military Survey 1869-1887 Digitized maps of the Habsburg Empire, 1 : 75 000. Tretie vojenské mapovanie na DVD-ROM, Arcanum Adatbázis Kft., Budapešť

Camenen B., Holubova K., Lukac M., Le Coz J. & Paquier A. (2011). Assessment of the methods using 1D modelling for computing bedload transport in a large river: the Danube River in Slovakia. J. of Hydraulic Engineering 137(10): 1190-1199.

Holubová, K., Capeková, Z., and Szolgay, J. (2004). "Impact of hydropower schemes at bed-load regime and channel morphology of the Danube River." M. Greco, A. Carravetta, and R. Della Morte, eds., Proc., 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics: River Flow 2004, Balkema,Rotterdam, Netherlands, 135–141.

Holubová, K., Capeková, Lukac, M. (2006): Zhodnotenie vplyvu vykonaných úprav Dunaja na súčasný stav a vývoj koryta vo vzťahu k zmenám vodného režimu. Záverečná správa, VÚVH, Bratislava, 51 s. a 110 s. prílohy.

Holubová, K., Lukáč, M. (2009): Prognóza morfologického vývoja dna Dunaja na úseku Sap-Komárno. In: Sedimenty vodných tokov a nádrží. Zborník prednášok z V. konferencie s Medzinárodnou účasťou. Bratislava, 05/2009. Bratislava: Slovenská vodohospodárska spoločnosť pri VÚVH, s. 189-200. ISBN 978-80-89062-61-4.

Holubová, K., Čomaj, M., Lukáč, M., Mravcová, K., Capeková, Z., Antalová, M. (2015): Obnova spoločných záplavových území Dunaja pre posilnenie protipovodňovej ochrany a zvýšenie ekologickej hodnoty ekosystému rieky. Záverečná správa slovenských partnerov. Projekt DuReFlood HUSK/1001/2.1.0060. VÚVH Bratislava

Schwarz, U., Holubová, K., Čuban,R., Matok,P., Bušovský,J. (2015): Hydromorphology – chapter 3 in Joint Danube Survey 3 – A Comprehensive Analysis of Danube Water Quality, pp 40-80. Edited by: Liska,I., Wagenr,F., Sengl, M., Deutsch,K., published by ICPDR – International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna. p.369.

Lukáč, M., Holubová, K., Szolgay, J. (2002): Výskum režimu plavenín a splavenín Dunaja pod Sapom. Záverečná správa o riešení. VTP 27-34 Výskum vplyvu antropogénnych faktorov na vodné systémy. VÚVH Bratislava

Szolgay, J. (1961): Hydrologický výskum vývoja koryta Dunaja. Záverečná správa, Výskumný ústav vodohospodársky, Bratislava, 138 s.

Sternberg, H., (1875). Untersuchungen über Langen und Querprofil deschiebeführende Flüsse. Z. Bauwesen, 25, 483-506.

LIFE 07 NAT/SK/000707 (2009-2015): Ochrana populácií ohrozených druhov vtáctva v prirodzených biotopoch vnútrozemskej delty Dunaja".(Protection of endangered birds populations in the natural habitats of the Danube Inland Delta) koordinátor projektu – BROZ.

EVALUATION AND MODELLING OF THE DANUBE RIVER CHANNEL MORPHOLOGICAL DEVELOPMENT IN THE SECTION BETWEEN SAP AND SZOB

Morphological development of the river Danube was evaluated in the section between Sap and Szob for the period 1992, 2006 and 2013. Analyses and morphological development was done using historical maps and information, results of actual topographic, hydraulic and morphological measurements. This includes identification of medium-term morphological changes in longitudinal profile of the Danube river bed (Fig.2) and quantification of -erosion/+deposition volumes based on assessment of changes in the cross sections area (Fig.3). The most dynamic changes of the river bed occurred over the first 10 years after Gabčíkovo hydropower plant was put into operation. The river bed degradation was the most intensive between Sap and Medveďov (4 m – 5 m in average, locally up to 7 m). Incision of the river bed continued in downstream direction up to km 1798. Largest volumes of the eroded sediments were deposited downstream of Kližská Nemá (km 1792) where the river bed slope significantly decreases (from i_{bed}~0,3% to i_{bed} ~0,05%). Relatively stable conditions (dynamic stability) prevailed in the Danube over the longer period at section between Komárno and Radvaň (km 1750). Alternation of erosion and deposition areas, are observed downstream of Radvaň where the morphological development of the river bed has been effected by natural bottom sills - Nyergyesujfalu (km 1832 -1835) and Štúrovo (km 1821-1829). Longitudinal

slope of the upper more dynamic section of the Danube (km 1810–1792) is successively diminishing, approaching the low slope of less dynamic section (km 1792–1707). The volume of eroded sediments is - 4.43 mil. m^3 in the upper section of the Danube (km 1810 - 1790) and sedimentation volume + 1.53 mil. m^3 in the section between km 1790 and km 1770 km for the whole investigated period 1992 to 2013 (tab.1, fig.3). Resulted deficit of sediments ~ 2.9 mil. m^3 for the Danube between Sap and Komárno is approximately equal to the volume of dredged sediment (3,3 mil. m^3). Development of the longitudinal profile and quantification of erosion/deposition areas indicate decrease in morphodynamic activity during the resent years, which resulted in less intense degradation/ aggradation of the river bed (fig.2, fig.3). However the process of the river bed incision still continues. This tendency, which is also confirmed by the results of morphological modelling can have a negative effect on navigation conditions and flood discharge dynamics.

Composition of the river bed represented by grain size distribution curves, provide useful information for analyses of the bed material changes in relation to various engineering interventions and also necessary data for the numerical modelling of morphological changes. The results of bed material sampling, which was done within investigated section of the Danube during years 2004-2006 and 2014 (fig.4) are used. Values of D_{50} can be divided into three different sections. Well-sorted bed material with almost constant values of D_{50} (~10 mm) is observed in the section Sap–Kližská Nemá. Situation is very similar at the next section up to Komárno but the grain size is slightly smaller (D_{50} ~5 mm). Degree of bed material sorting and the low variability of D_{50} values reflect the impact of sediment deficit (trapping effect of Hrušov reservoir) and the effect of channel structures (groyne fields). In a less affected section (Komárno–Szob), the bed material composition shows much wider variations of D_{50} that is closer to the natural conditions. Due to several impacts on composition of the river bed material downstream fining of the bed sediments is not observed (fig.4) at investigated section of the river Danube.

The numerical model MIKE 11 (DHI software) with morphological modul was used to analyse the hydraulic conditions that influence the sediment transport and predict morphological development in the future. The hydrodynamic model was calibrated and verified for a wide range of discharge situations, and hence provided a reliable and relevant basis for morphological modelling. The comparison of calculated / measured values of bedload transport indicated the best equation for sediment transport simulation on the Danube: Sato–Kikkawa–Ashida formula. Model simulations with different river channel topographies (1994, 2001, 2013) provided an overview of the changing dynamics of sediment transport in the Slovak–Hungarian stretch of the Danube since Gabčíkovo hydropower plant was put into operation up today (fig.5). One of the consequences of riverbed incision is a drop in the river bed slope, which reduces the intensity of sediment transport. The flow velocity and the shear stress (fig.6) in the riverbed are further key hydraulic variables that affect the sediment transport. The most significant morphological changes were simulated for the section between Sap and the mouth of the Mosoni Danube. The extensive groyne fields and the river's gradient in this section caused concentrated water flow, grain size sorting in the bed material, and intensive sediment transport, even at low discharges (less than 1,000 $m^3.s^{-1}$) according to the results of model simulations.

Using a model the prediction of morphological development of the Danube river bed was simulated for a time horizon of 10 years. The results indicated gradual incision of riverbed as a prevailing process, but erosion depth can exceed 1 m only at km 1798,190. Similar process is predicted for several sections: km 1798,8–1798,1; km 1789,1–1787,3; km 1785,2–1784,5; km 1775,9–1775,5 and especially km 1770,8–1767,5 – upstream of the Komárno bridge. Downstream of the Váh river's mouth, the predicted intensity of riverbed degradation is gradually reduced with changes not exceeding ±5 cm. Sediment deposition, which rarely exceeds 0.5 m, was predicted only in certain areas, with a maximum thickness of 2,3 m at km 1778,240. In general, the prognosis of the Danube river bed development assumes that the intensity of morphological changes will be moderate in the near future, which corresponds to the previously predicted trends of decreasing in the Danube river bed slope.

Miroslav Lukáč, Ing., PhD.,
Katarína Holubová, Ing. PhD.
Výskumný ústav vodného hospodárstva
Tel.: 02 59 343 397, 02 59 343 310
Fax: 02 54 418 479
E-mail: lukac@vuvh.sk
holubova@vuvh.sk