

VÝSKUMNÝ ÚSTAV VODNÉHO HOSPODÁRSTVA
Nábr. arm. gen. L. Svobodu č. 5, 812 49 Bratislava



Riešiteľ:

Ing. Katarína Holubová, PhD.

Názov úlohy:

**Hodnotenie vplyvu vykonaných
úprav na morfológický vývoj koryta
Dunaja a zdrže Čunovo
a prehodnotenie priebehu
smerodajných hladín**

Názov čiastkovej úlohy:

Interné číslo úlohy:

21005

Kód úlohy:

Gestor:

Ing. Juraj Šiatkovský



Bratislava január 2022

Generálny riaditeľ ústavu:

Ing. Katarína Holubová, PhD.

Riaditeľ odboru:

Ing. Dušan Abaffy, PhD.

Vedúci oddelenia:

Mgr. Katarína Mravcová

Zodpovedný riešiteľ:

Ing. Katarína Holubová, PhD.

Spoluriešiteľ:

Ing. Miroslav Lukáč, PhD.

Spolupracovníci:

Ing. Radoslav Čuban

Ing. Peter Matok

Ing. Peter Baránek

Mgr. Martin Studený

Stanislav Bernhauer

Juraj Petrisko

Spolupracujúce externé organizácie:

OBSAH

	Strana
1 Úvod.....	4
2 Plaveninový režim Dunaja – profil most Lafranconi..	6
3 Aktualizácia hydrodynamických modelov Dunaja a zdrže Hrušov	13
3.1 1D hydrodynamický model Dunaja na slovensko-rakúskom úseku a zdrže Hrušov	13
3.2 1D hydrodynamický model Dunaja na slovensko-maďarskom úseku	29
4 Literatúra	41

1. ÚVOD

Zameranie a ciele: Úloha *“Hodnotenie vplyvu vykonaných úprav na morfológický vývoj koryta Dunaja a zdrže Čunovo a prehodnotenie priebehu smerodajných hladín“* nadväzuje na dlhodobé sledovanie a posudzovanie vplyvu vykonaných úprav na súčasný stav a vývoj koryta vo vzťahu k zmenám vodného režimu v oblasti pod Sapom, vrátane stanovenia hladín smerodajných prietokov (Holubová, Capeková, Lukáč, 2006), podľa potrieb špecifikovaných SK-HU a SK-AT Komisiami hraničných vôd. Úloha vyplýva z požiadaviek Dunajskej Komisie a jej riešením Ministerstvo životného prostredia SR poverilo VÚVH ako rezortnú organizáciu. Dlhodobý program, ktorý prebieha v niekoľkých etapách sa sústreďuje na nasledovné hlavné oblasti:

- **Hydromorfologické zmeny koryta Dunaja** - sledovanie a hodnotenie laterálnych a pozdĺžnych morfológických zmien koryta Dunaja na základe opakovaných zameraní topografie koryta (pričné profily) a posúdenia zmien v zložení dnových sedimentov (opakované odbery vzoriek dnových sedimentov). Dlhodobý monitoring morfológie dna Dunaja, ktorý sa do roku 2018 vykonával na úseku km 1880 až km 1872 sa predĺžil až po sústavu vodných diel v Čunove a tiež prírodný kanál po VD Gabčíkovo
- **Plaveninový režim Dunaja** - sledovanie a hodnotenie zmien transportu sedimentov najmä plavenín na základe pravidelných odberov vrátane sledovania ich fyzikálnych charakteristík; kvantifikovanie odtoku sedimentov a posúdenia vývoja
- **Komplexné zhodnotenie vplyvu vykonaných úprav na hydromorfológiu Dunaja** - vplyv inžinierskych zásahov a iných zásahov do koryta: napr. výhony, smerné stavby, bagrovanie, odstránenie brehového opevnenia, umelé dozásobovanie koryta splaveninami, vplyv vodných diel (VD Gabčíkovo, Freudenu, atď.) v krátkodobom i strednodobom horizonte a to na základe výsledkov monitorovania hydromorfologických zmien a transportu sedimentov. Takéto celkové zhodnotenie sa vykonáva po dlhšom období monitorovania – odporúča sa 5 rokov v prípade ak nedochádza k významnejším zmenám (zásahom prípadne významnejším povodňami).

- **Aktualizácia hydrodynamických modelov Dunaja na slovensko-rakúskom a slovensko-maďarskom úseku rieky** – aktualizácia, kalibrácia a verifikácia 1D modelov a ich aplikácia na výpočet priebehu hladín smerodajných prietokov pre potreby Dunajskej Komisie a bilaterálnych (SK-AT a SK-HU) Komisií pre hraničné vody.

2. PLAVENINOVÝ REŽIM DUNAJA - PROFIL MOST LAFRANCONI

2.1 Merania koncentrácií plavenín

Pravidelné odbery vzoriek plavenín sa vykonávali zo strednej časti mosta Lafranconi (integračné odbery lapákom VÚVH) v závislosti od hydrologických podmienok Dunaja. V prípade zotrvaných stavov častejšie. Z odobratých vzoriek vody sa stanovujú koncentrácie nerozpustených látok – plavenín v laboratóriách VÚVH.

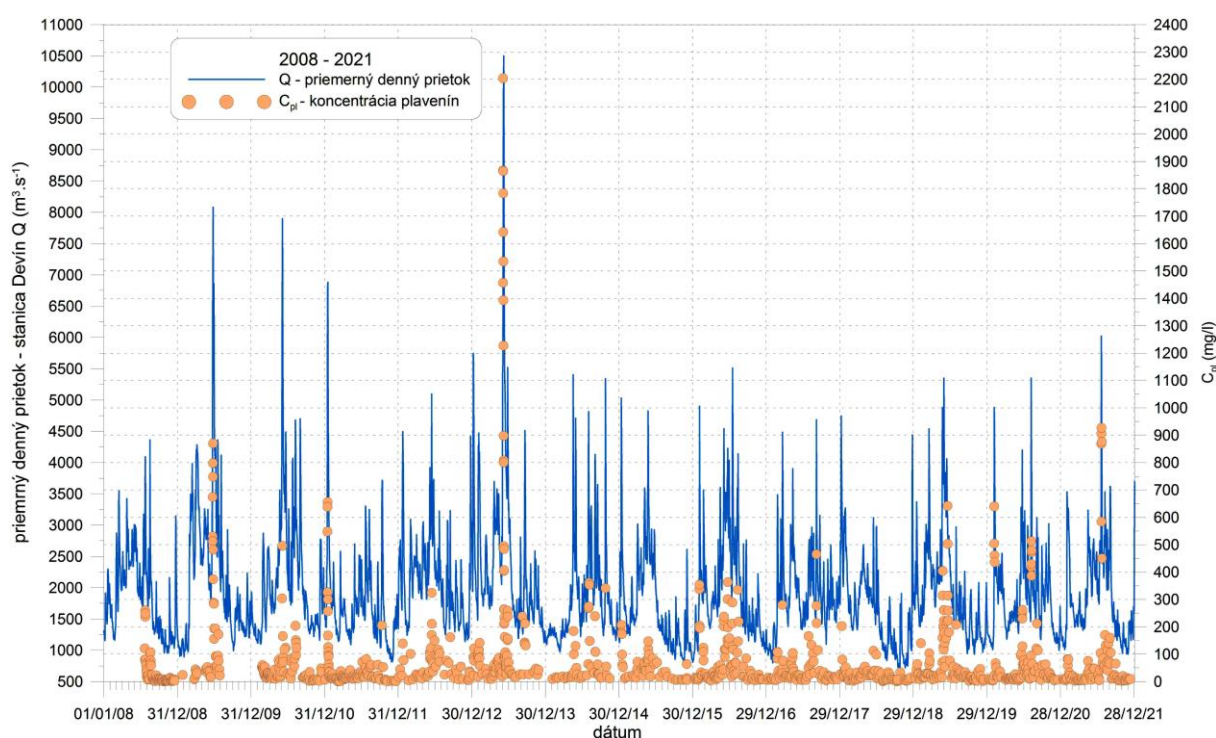


Obr.2.1 Integračné odbery vzoriek vody lapákom plavenín (VÚVH) – lokalita most Lafranconi

Merania sa vykonávajú tradičnou metódou integračných odberov, ktorá síce poskytuje spoľahlivé okamžité výsledky, avšak veľkou nevýhodou je takýmto spôsobom nie je možné získať kontinuálny záznam o hodnotách koncentrácií plavenín tzn. premenlivosť závislosti koncentrácie plavenín v čase a ani ďalšie hydraulické a morfológické charakteristiky najmä rýchlosti, granulometrické zloženie plavenín, ktoré umožňujú detailnejší výskum režimu jemnozrnných sedimentov. Nevýhody meraní vykonávaných tradičnými metódami je možné čiastočne eliminovať využitím moderného prístrojového vybavenia – ultrazvukové alebo optické prístroje.

2.2 Spracovanie výsledkov meraní:

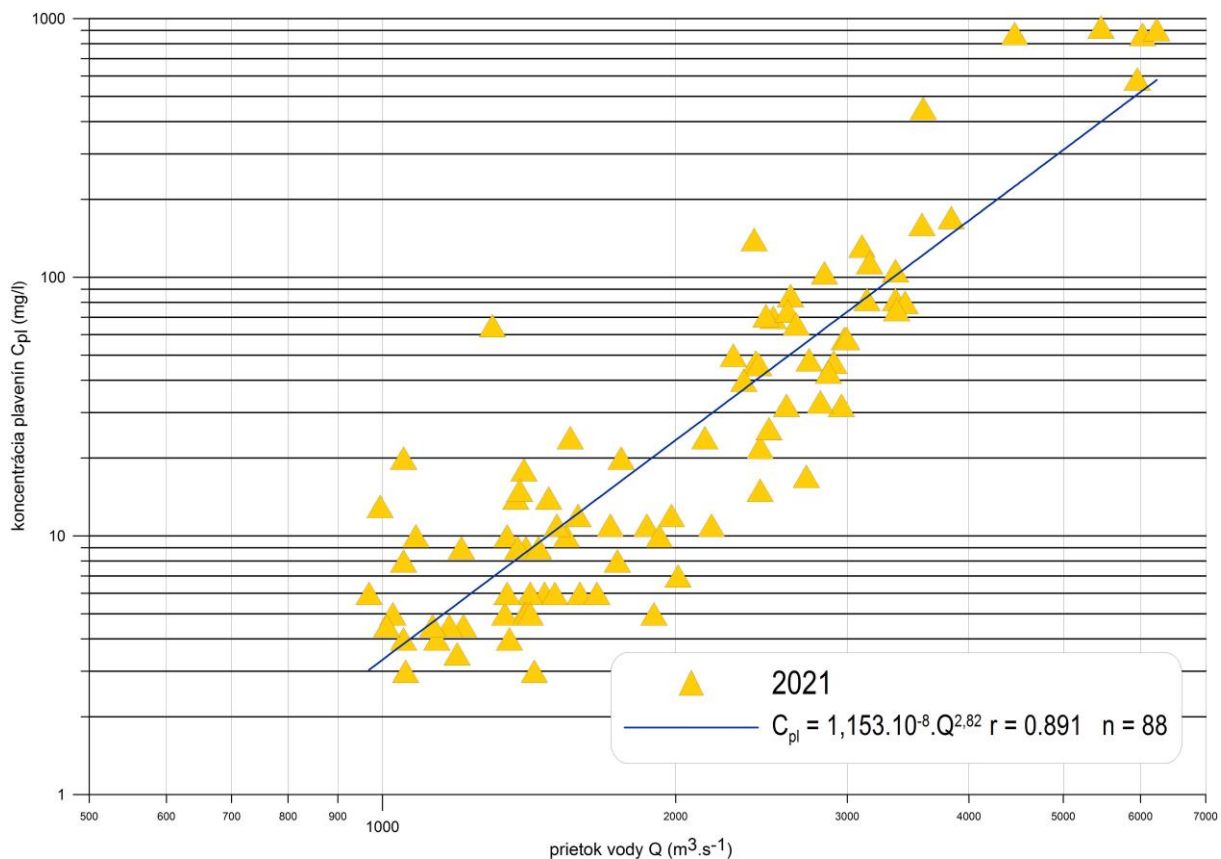
V rámci dlhodobého prieskumu plaveninového režimu sa vykonávali pravidelné odbery vzoriek plavenín z Dunaja zo strednej časti profilu v lokalite most Lafranconi (integračné odbery lapákom, VÚVH). Vzorkovanie sa vykonávalo v závislosti od hydrologických podmienok Dunaja (min.2 krát týždenne) s cieľom zdokumentovať najmä zvýšené prietoky. Prietok vody v stanici Devín sa počas odberov v roku 2021 pohyboval v intervale ($969 \text{ m}^3\text{s}^{-1} < Q < 6235 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Vzorky plavenín sa neodoberali v období výskytu ľadových úkazov (bezpečnostné dôvody). K 16.12.2021 sa odobralo 88 vzoriek, z ktorých sa vyhodnotili koncentrácie plavenín v laboratóriách VÚVH ($3 \text{ mg.l}^{-1} < C_{pl} < 927 \text{ mg.l}^{-1}$). Odbery pokračovali až do konca roka. Výsledky boli priebežne doplnené do databázy údajov o plaveninovom režime Dunaja. V tejto časti priebežnej správy za rok 2021 hodnotíme výsledky, ktoré boli k dispozícii do 16.12.2021. Napriek pretrvávajúcej pandemickej situácii a rôznym komplikáciám s ňou spojeným sa podarilo odobrať dostatočné množstvo vzoriek. Výsledky budú použité v numerickom modeli zanášania zdrže Hrušov (prognóza vývoja).



Obr.2.2: Hodnoty zameraných koncentrácií plavenín Dunaja (VÚVH, 2008-2021) v profile most Lafranconi a priemerné denné prietoky (SHMÚ -stanica Devín)

Priebeh hodnôt meraných koncentrácií plavenín Dunaja za rok 2021 vo vzťahu k denným prietokom je graficky znázornený na obr.2.2, kde sú aj hodnoty za celé monitorovacie obdobie, teda od roku 2008. Z hydrologického hľadiska možno rok 2021 predbežne hodnotiť skôr ako mierne suchý rok s výskytom maximálneho prietoku $Q_{max} \sim 6235 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Hodnoty koncentrácií plavenín boli pri tomto prietoku vysoké ($C_{pl} \sim 906 \text{ mg.l}^{-1}$), ale nie najvyššie ($C_{pl} \sim 927 \text{ mg.l}^{-1}$ pri $Q \sim 5464 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Odvodené vzťahy koncentrácií plavenín resp. prietoku plavenín a prietoku vody pre Dunaj v profile Lafranconi za obdobie roku 2021 sú graficky uvedené na obr. 2.3 a obr. 2.4. Regresný vzťah koncentrácie plavenín a prietoku vody je odvodený v tvare (pre väčšiu časť roka 2021):

$$C_{pl} = 1,153 \cdot 10^{-8} \cdot Q^{2,82} \quad r = 0,891 \quad n = 88 \quad (1)$$

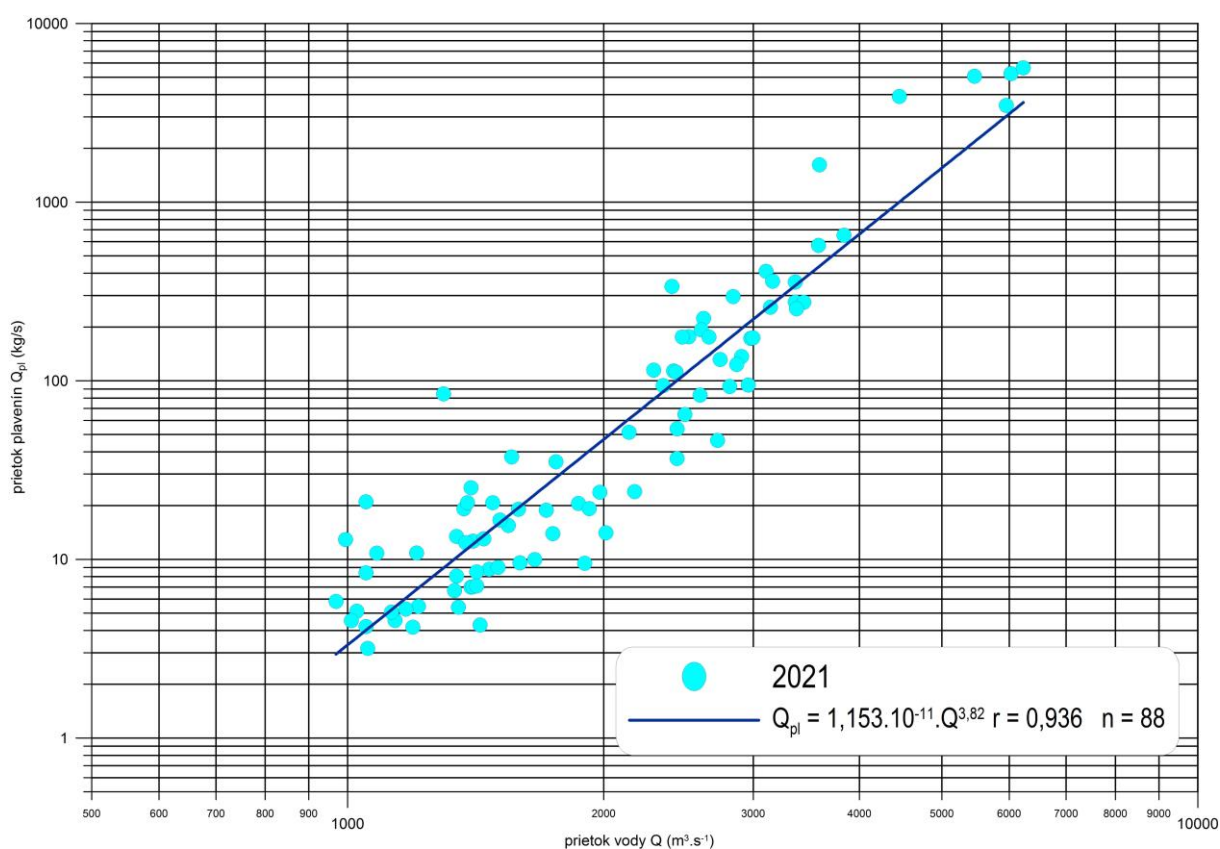


Obr.2.3 Závislosť koncentrácií plavenín a prietoku vody - Dunaj (Lafranconi), 2021

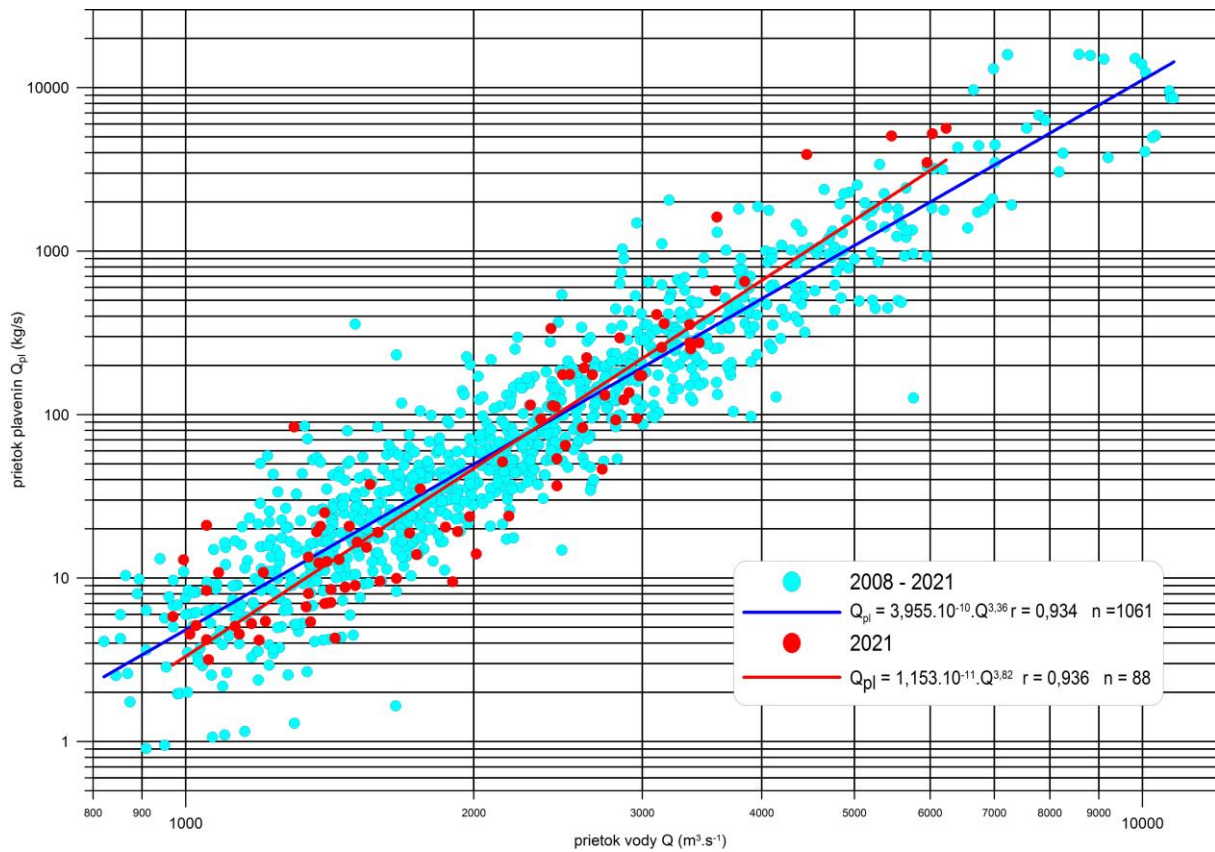
Regresný vzťah pre výpočet prietoku plavenín odvodený z hodnôt nameraných koncentrácií má nasledovný tvar:

$$Q_{pl} = 3,333 \cdot 10^{-12} \cdot C_{pl}^{4,00} \quad r = 0,969 \quad n = 93 \quad (2)$$

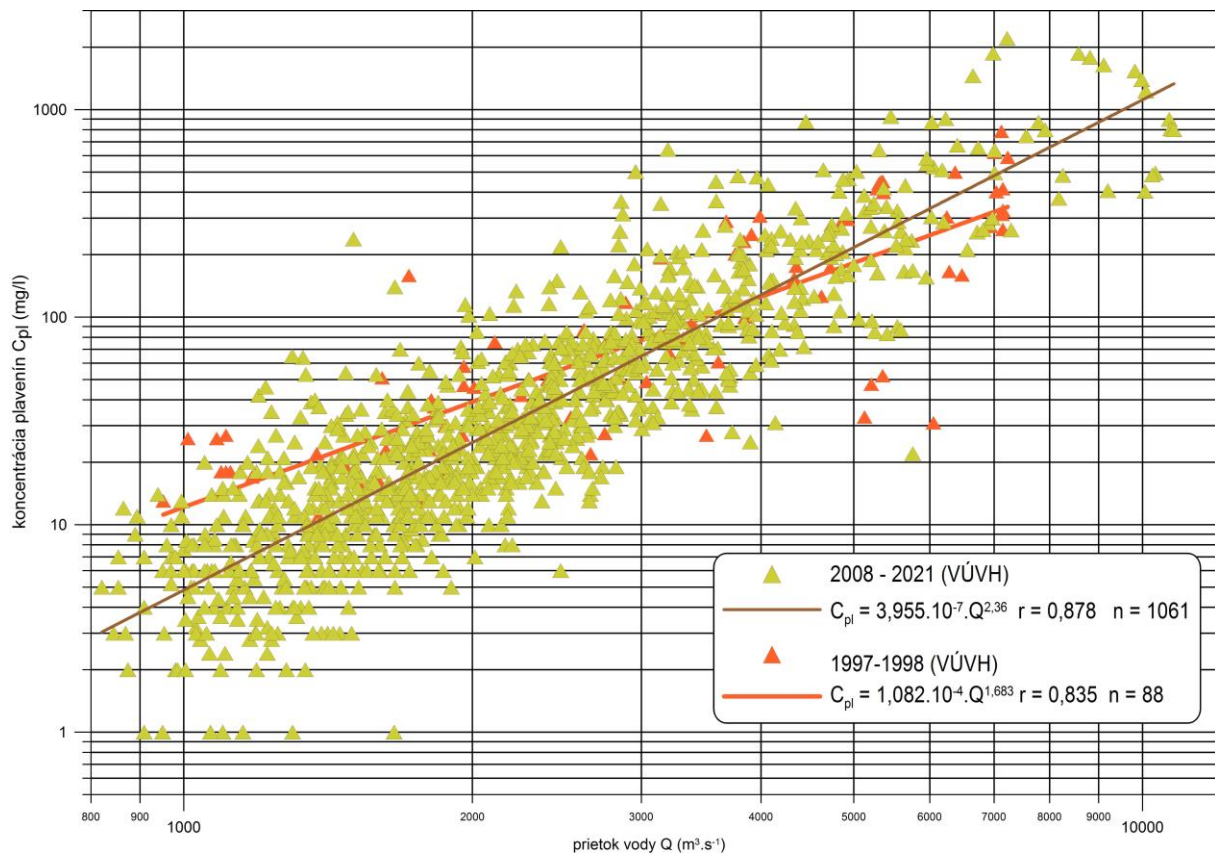
Vysoké hodnoty koeficientu korelácie v oboch rovniciach (1), (2) preukazujú vysokú mieru závislosti a pomerne malý rozptyl bodov. Výsledky monitorovania plavenín za rok 2021 dopĺňujú existujúci súbor údajov najmä v oblasti prietokov v rozsahu od 969 m^3s^{-1} do 6235 m^3s^{-1} (obr.2.4, obr.2.5). Z hodnotenia a porovnania výsledkov získaných za rok 2021 s celým monitorovaným obdobím vyplýva, že v porovnaní s dlhodobým priemerom bol v roku 2021 prietok plavenín vyšší ako v minulom roku (obr. 2.5) pre prietoky väčšie ako $\sim 2500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.



Obr.2.4 Závislosť prietoku plavenín a prietoku vody - Dunaj (Lafranconi), 2021



Obr.2.5 Porovnanie závislosti prietoku plavenín Dunaja (Lafranconi) pre obdobie 2008-2021 a 2021



Obr.2.6 Porovnanie vzťahov pre výpočet koncentrácií plavenín Dunaja (Lafranconi) pre dve obdobia

Výsledky meraní za celé monitorované obdobie (2008-2021) sú porovnané aj s meraniami z obdobia deväťdesiatych rokov (1997-1998) (Holubová a kol., 1998). Graficky sú výsledky znázornené na obr. 2.6, kde sú okrem hodnôt koncentrácie plavenín aj regresné čiary pre obidve porovnávané obdobia. Regresné vzťahy pre výpočet koncentrácie plavenín sú:

$$\text{pre obdobie 2008 až 2021 } C_{pl} = 3,955 \cdot 10^{-7} \cdot Q^{2,36} \quad r = 0,878 \quad n = 1061 \quad (3)$$

$$\text{pre obdobie 1997 až 1998 } C_{pl} = 1,082 \cdot 10^{-4} \cdot Q^{1,683} \quad r = 0,835 \quad n = 88 \quad (4)$$

Z priebehu regresných čiar vyplýva, že výraznejšie rozdiely sa vyskytujú v oblasti nižších prietokov ($1\,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ až $2\,500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Pri výskyte týchto prietokov sú koncentrácie plavenín vyššie ako boli hodnoty zamerané v období 1997-1998. Pri vyšších prietokoch vody v Dunaji sa hodnoty koncentrácií z obdobia (1997-1998) približujú tým súčasným. To môže mať viacero príčin. Predovšetkým treba vziať do úvahy, že merania z deväťdesiatych rokov boli získané v iba obmedzenom časovom období dvoch rokov, čo je s ohľadom na značnú časovú variabilitu hydrologických podmienok a tiež koncentrácií plavenín Dunaja, príliš krátke obdobie pre získanie reprezentatívnych výsledkov. Ďalším dôvodom súčasného zníženia hodnôt koncentrácií plavenín môže byť zvýšenie počtu čistiarní odpadových vôd ako aj zvýšenie efektívnosti tých súčasných. Predpokladáme preto že za súčasných podmienok sa do vôd Dunaja dostáva podstatne menej odpadových látok, ktoré môžu prispievať aj k zvýšenému obsahu nerozpustných častíc– plavenín.

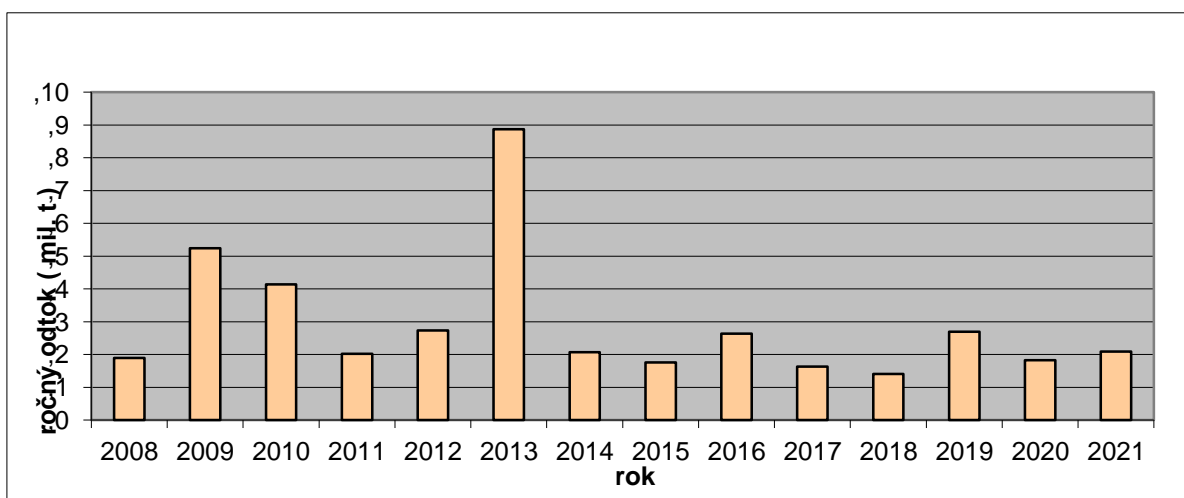
Odtok plavenín– kvantifikácia: Pre celé monitorovacie obdobie (2008-2021) sme stanovili ročné odtečené množstvá plavenín s využitím vzťahu pre prietok plavenín:

$$Q_{pl} = 3,955 \cdot 10^{-10} \cdot Q^{3,36} \quad r^2 = 0,934 \quad n = 1061 \quad (5)$$

Odtoky plavenín sú stanovené s využitím rovnice (5) na výpočet prietoku plavenín a radu pozorovaných priemerných denných prietokov (2008 až 2021). Hodnoty ročných odtokov plavenín pre jednotlivé roky sú uvedené v tabuľke 2 a graficky sú znázornené na obr.2.7.

Tab.2: Ročné odtoky plavenín Dunaja v profile most Lafranconi

rok	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Roč. odtok plavenín (t)	1.900	5.239	4.144	2.025	2.734	8.873	2.077	1.757	2.6355	1.630	1.410	2.699	1,831	2,087



Obr.2.7: Ročné odtoky plavenín Dunaja – profil most Lafranconi

Variabilita ročných odtokov plavenín (obr.2.7) závisí od konkrétnych hydrologických podmienok v danom roku. Celkove za sledované obdobie odtieklo profilom most Lafranconi 41 045 450 ton plavenín. Predpokladáme, že väčšia časť týchto sedimentov sa usadzuje v zdrži Hrušov.

3. AKTUALIZÁCIA HYDRODYNAMICKÝCH MODELOV DUNAJA A ZDRŽE HRUŠOV

V súlade so špecifikáciou prác boli v roku 2021 realizované nasledujúce aktivity:

- aktualizácia matematického modelu koryta Dunaja a zdrže Hrušov medzi Devínom a Čunovom a matematického modelu koryta Dunaja medzi Sapom a Szobom
- modelové simulácie prúdenia vody a transportu sedimentov,
- analýza hydraulických podmienok, ktoré ovplyvňujú transport sedimentov v koryte Dunaja a v zdrži Hrušov.

3.1 Matematický model koryta Dunaja a zdrže Hrušov medzi Devínom a Čunovom

Pre analýzu hydraulických pomerov, ktoré ovplyvňujú transport sedimentov, bol meraniami z roku 2020 aktualizovaný jednorozmerný (1D) matematický model Dunaja a zdrže Hrušov na úseku medzi Devínom a objektmi SVD v Čunove. Aplikovaným softvérovým prostriedkom je komerčný model MIKE 11 dánskej spoločnosti DHI Water & Environment. Hydrodynamický model schematizuje prúdenie vody v riešenom úseku pri rôznych hydrologických a hydraulických podmienkach. Zároveň je základom pre model transportu sedimentov. V roku 2021 boli aktualizované aj časové rady pozorovaných hladín vody a prietokov vo vodomerných staniciach SHMÚ Devín, Bratislava a Čunovo. Aktualizovaný model 2020 bol verifikovaný meraniami hladiny vody v pozdĺžnom profile (vodomerné stanice SHMÚ a viadonau)

Okrajové podmienky matematických modelov sú nasledovné:

- prietok Dunaja v profile vodomernej stanice SHMÚ Bratislava Devín (rkm 1879,800),
- hladina vody v Čunove (rkm 1851,750).

Verifikované modely boli v roku 2021 použité na simulácie prúdenia vody a transportu sedimentov. Rýchlosť prúdenia vody a šmykové (tangenciálne) napätie pri dne sú kľúčové hydraulické veličiny, ktoré ovplyvňujú transport sedimentov. Keďže bol pri simuláciách použitý jednorozmerný matematický model, výsledkom simulácií sú priemerné hodnoty týchto veličín v jednotlivých výpočtových bodoch modelu, ktoré predstavujú priečne profily koryta a inundácií Dunaja.

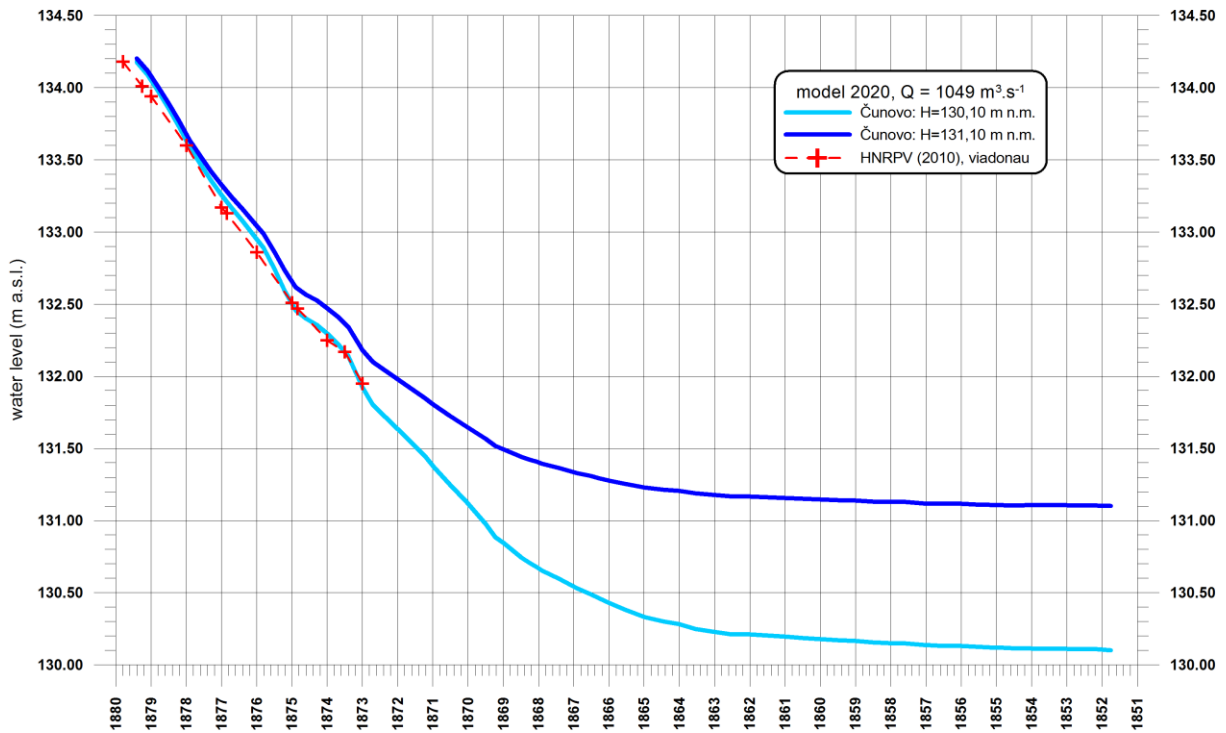
Za účelom kvantifikácie vplyvu morfológických zmien koryta Dunaja a zdrže Hrušov na hydraulické pomery v záujmovom úseku boli zostavené dva základné topografické modely koryta Dunaja. Prvý (ďalej označený ako „model 2002“) pozostával z priečnych profilov zameraných v roku 2002, druhý model (ďalej „model 2020“) schematizuje súčasný stav (merania koryta Dunaja z roku 2020), ktorý bol verifikovaný v roku 2021.

S kalibrovanými modelmi boli následne simulované rôzne hydrologické situácie - od nízkej regulačnej plavebnej vody po vysokú plavebnú vodu. Pri týchto prietokoch je voda Dunaja v riešenom úseku koncentrovaná v koryte, len lokálne vybrežuje (pri vysokej plavebnej vode) do inundačných území. Prietoky koncentrované v hlavnom koryte sú rozhodujúce z pohľadu transportu sedimentov. Hodnoty smerodajných prietokov (Q-HNRPV, Q-HVPV a Q-HSV) uvádzame v tabuľke 3.1.1.

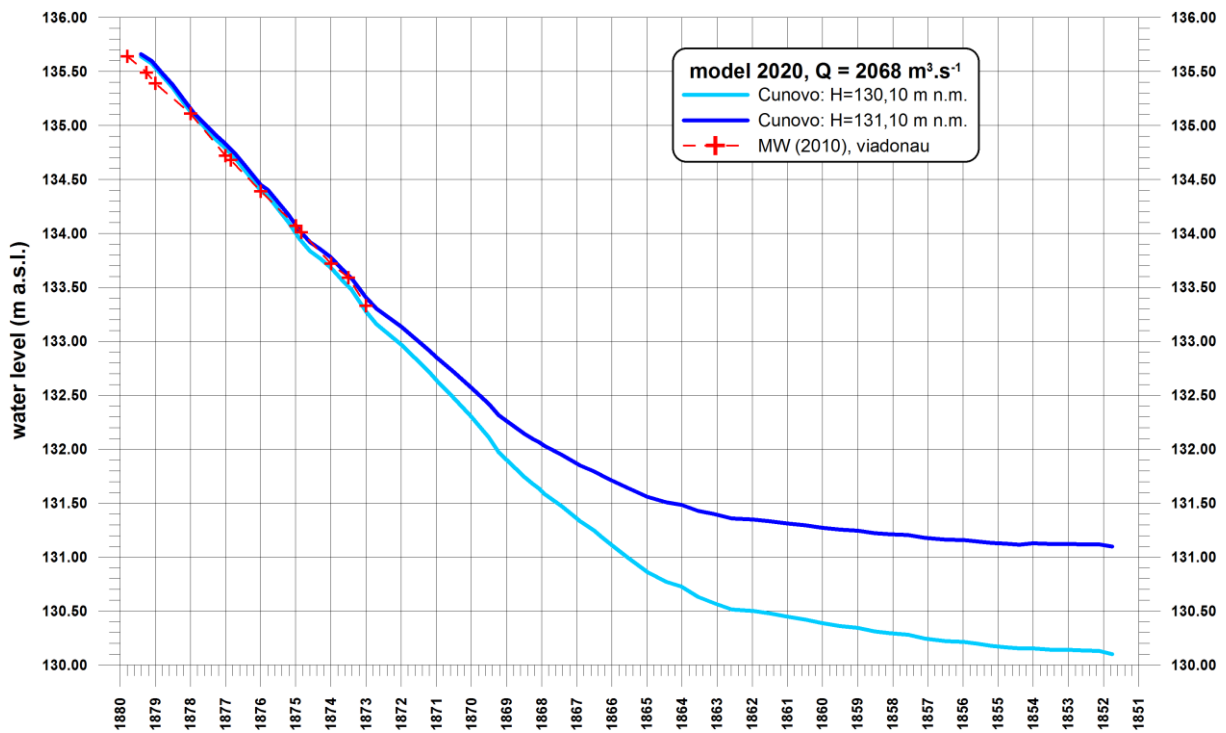
Tab. 3.1.1: Smerodajné prietoky v stanici Dunaj-Bratislava odvodené z obdobia (1981-2010)

Smerodajný prietok	Nízka regulačná plavebná voda	Vysoká plavebná voda	Stredná plavebná voda
označenie	Q-NRPV	Q-VPV	Q-SV
Q (m ³ .s ⁻¹)	1049	5340	2068

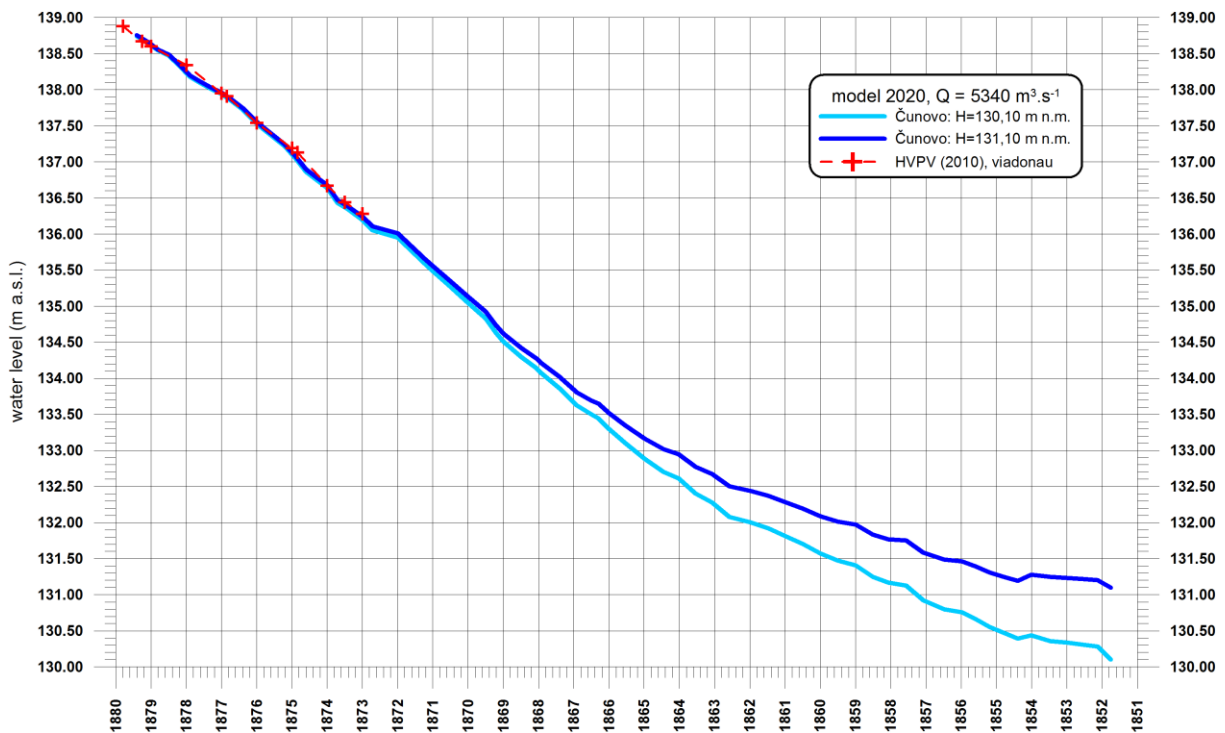
Na dolnom okraji modelu boli nastavované hladiny Dunaja v rozpätí bežných prevádzkových situácií, t.j. v intervale <130,10-131,10> m n.m. Modelom 2020 simulované hladiny pre nízku regulačnú plavebnú vodu, strednú plavebnú vodu a vysokú plavebnú vodu a pre spomínaný interval prevádzkových hladín sú znázornené na obrázkoch 3.1.1-3.1.3. Porovnané sú s priebehom aktuálne platných, medzinárodne odsúhlasených hladín smerodajných prietokov (viadonau, 2012).



Obr. 3.1.1: Porovnanie simulovanej hladiny Dunaja so smerodajnou hladinou nízkej regulačnej plavebnej vody



Obr. 3.1.2: Porovnanie simulovanej hladiny Dunaja so smerodajnou hladinou strednej plavebnej vody



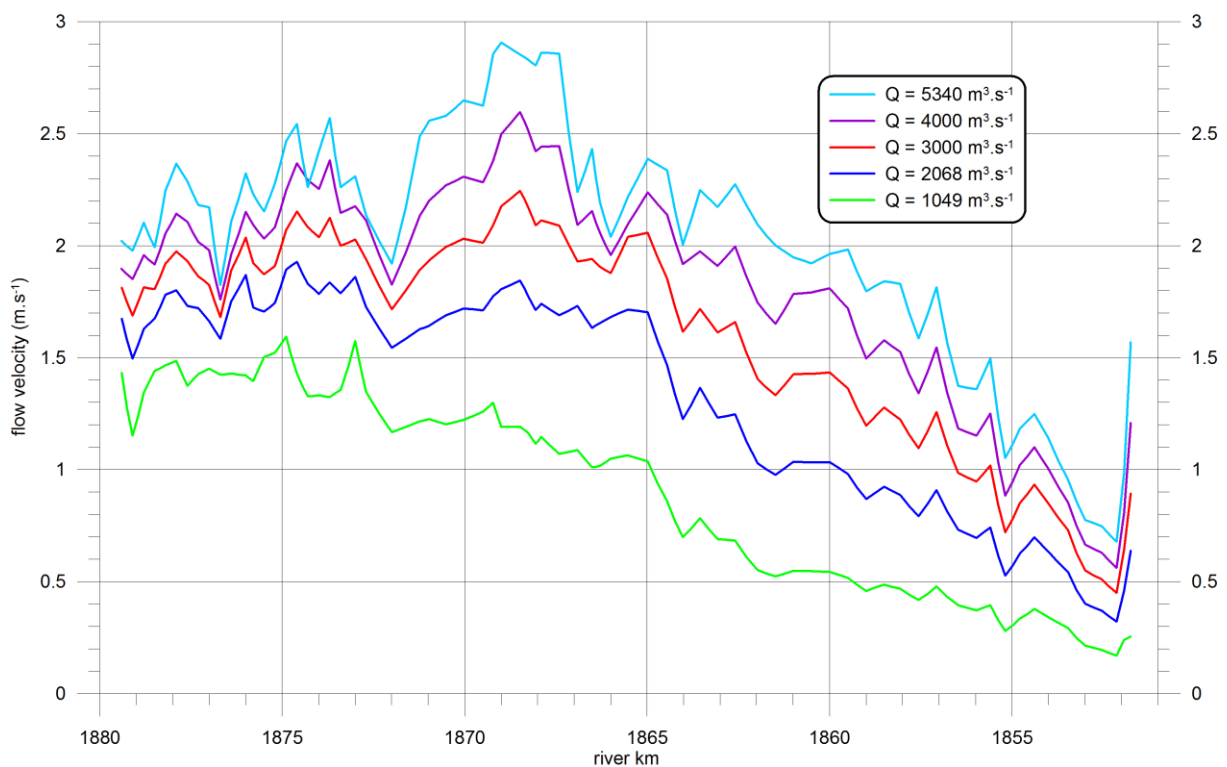
Obr. 3.1.3: Porovnanie simulovanej hladiny Dunaja so smerodajnou hladinou vysokej plavebnej vody

Vplyv vzdutia hladiny Dunaja objektmi SVD G-N v Čunove sa postupne vytráca, pri vysokej plavebnej vode približne na úrovni mostu Lafranconi, pri nízkej regulačnej plavebnej vode na úrovni riečneho km 1878.

Hladiny simulované modelom 2020 zodpovedajú aktuálne platným smerodajným hladinám nízkej regulačnej plavebnej vody (HNRPV-2010) a strednej plavebnej vody (HSV-2010) približne po rkm 1878. Na úseku medzi rkm 1878 a vodočtom v Devíne sú modelom simulované hladiny pri týchto charakteristických prietokoch vyššie. Pri vysokej plavebnej vode sú simulované hladiny na niektorých úsekoch (rkm 1877-1879 a rkm 1873-1875) približne o 10-15 cm nižšie ako aktuálne hladiny vysokej plavebnej vody (HVPV-2010).

Modelom 2020 simulované priemerné rýchlosti prúdenia po vysokú plavebnú vodu sú na obrázku 3.1.4. Zrejmý je výrazný trend poklesu rýchlosti prúdenia vody smerom k objektom v Čunove, ktorý sa pri nízkej regulačnej plavebnej vode prejavuje už nad mostom Lafranconi (približne od rkm 1873), pri vyšších prietokoch od rkm 1866 (pod Prístavným mostom). Maximálna hodnota $v_{max} = 3 \text{ m.s}^{-1}$ bola modelom 2020 pri vysokej plavebnej vode simulovaná v rkm 1873,700 (profil pf23), t.j. na prechode z oblúka do priamej trati koryta Dunaja nad rakúskou vodočtetnou stanicou

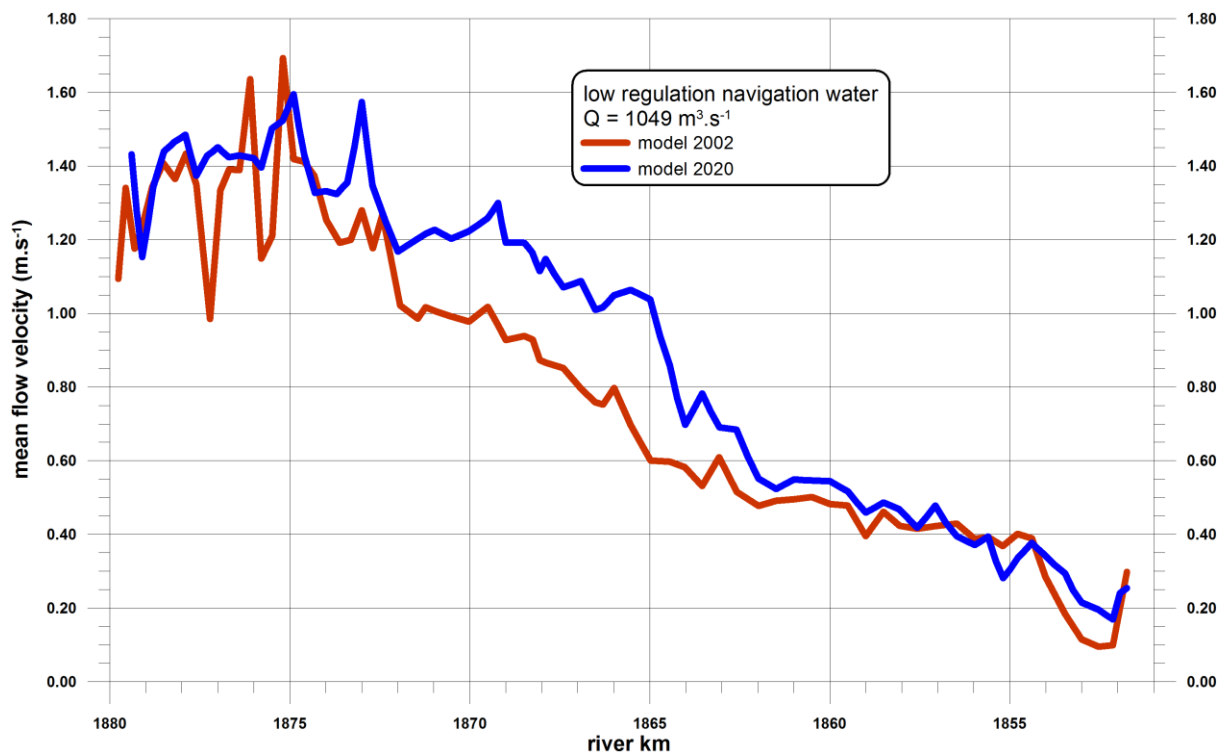
Berg (rkm 1873,500), pod bratislavským sídliskom Dlhé Diely. Najväčšie hĺbky v priečnom profile koryta sú tu pri pravom, rakúskom brehu. V nadväzujúcej priamej trati koryta priemerné rýchlosti prúdenia výrazne klesajú pod $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v rkm 1872,0 (pf28). Rozdiely medzi simulovanými priemernými profilovými rýchlosťami prúdenia na úseku medzi mostom Lafranconi a vjazdom do prístavného bazénu Pálenisko (1871,300-1865,500) nie sú v pozdĺžnom profile veľké pre jednotlivé charakteristické prietoky, do $\pm 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ďalej sa už výraznejšie prejavuje vzdutie vody a postupný pokles rýchlostí prúdenia vo vlastnej zdrži Hrušov (od rkm 1860). V širokom prietokovom profile zdrže pred objektmi v Čunove (pf74 – rkm 1852,135) priemerná rýchlosť prúdenia pri všetkých simulovaných situáciách klesá pod hodnotu približne $v_{\min}=0,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pri nízkej regulačnej plavebnej vode $v_{\min}=0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na úrovni objektov v Čunove (pf75 – rkm 1851,750) sa rýchlosti prúdenia zvyšujú na hodnoty $0,3\text{-}1,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pre jednotlivé simulované hydrologické situácie, čo je spôsobené signifikantným zúžením prietokového profilu zdrže pri galérii Danubiana a následnou koncentráciou prietoku.



Obr. 3.1.4: Priemerné rýchlosti prúdenia simulované modelom 2020

Výsledky modelových simulácií umožnili porovnať zmeny hydraulických pomerov, ktoré ovplyvňujú transport sedimentov, medzi referenčným (model 2002) a súčasným (model 2020) stavom pre prietoky do úrovne vysokej plavebnej vody.

Porovnanie priemerných rýchlostí prúdenia vody Dunaja na úseku medzi Devínom a Čunovom je na sérii obrázkov 3.1.5-3.1.7.

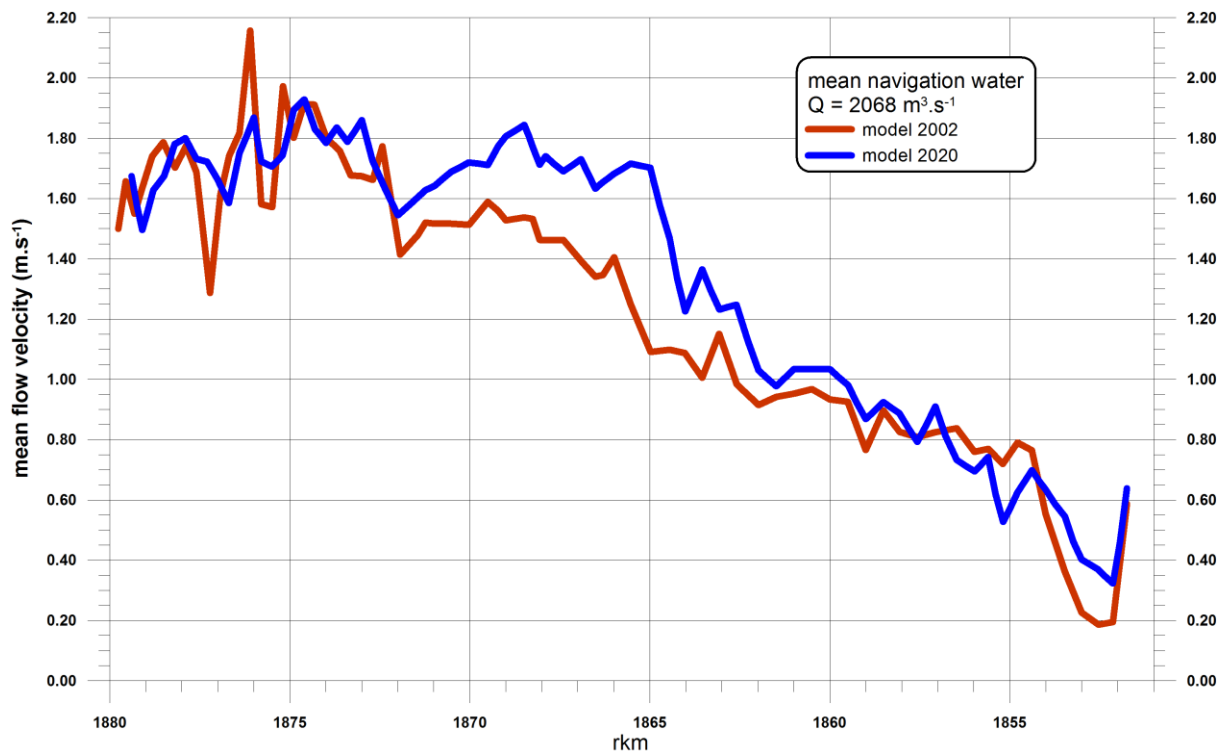


Obr. 3.1.5: Porovnanie priemerných rýchlostí prúdenia vody s modelmi 2002 a 2020 – nízka regulačná plavebná voda

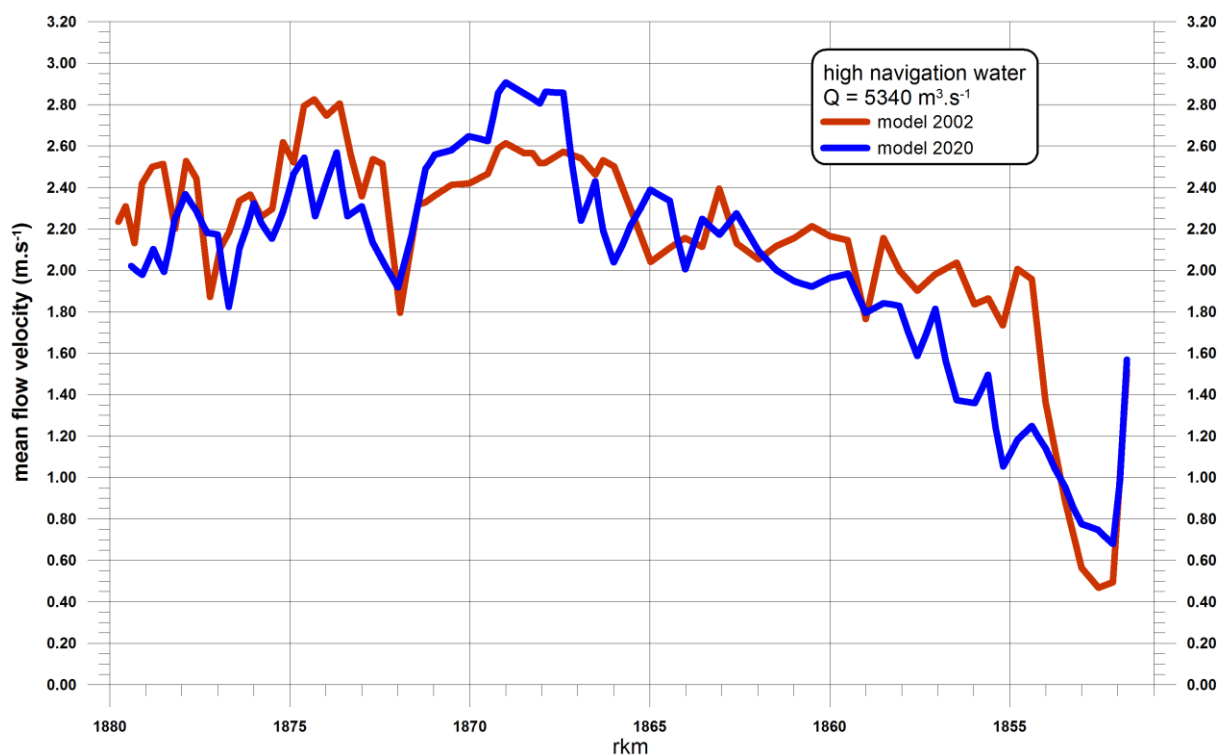
Pri nízkej regulačnej a strednej plavebnej vode boli modelom 2002 simulované maximálne rýchlosti prúdenia na úseku rkm 1876,1-1875,2. Pri vyšších prietokoch sa simulované maximá pre referenčný stav 2002 posúvajú nižšie, k rkm 1874,300 (pf21, vrchol oblúka Dunaja).

Pre všetky simulované hydrologické situácie platí, že rýchlosti prúdenia sú pre súčasný stav väčšie ako pre referenčný takmer na celom úseku medzi mostom Lafranconi a koncom zdrže.

Vo vlastnej zdrži, až po rkm 1853,0 (pf72) sú simulované rýchlosti prúdenia vody v súčasnom stave výrazne, miestami až 2-násobne menšie v porovnaní s referenčným stavom.



Obr. 3.1.6: Porovnanie priemerných rýchlostí prúdenia vody s modelmi 2002 a 2020 –
 stredná plavebná voda



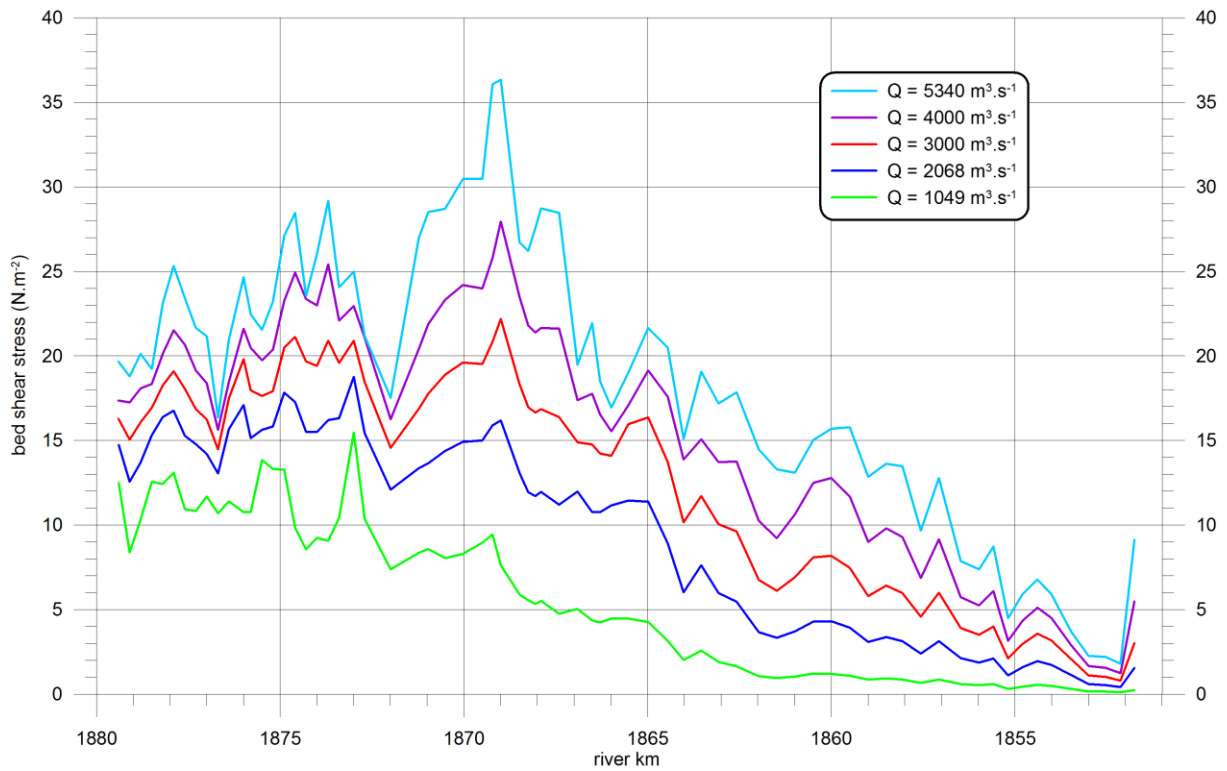
Obr. 3.1.7: Porovnanie priemerných rýchlostí prúdenia vody s modelmi 2002 a 2020 –
 vysoká plavebná voda

Šmykové napätie pri dne koryta rieky rozhodujúcou mierou ovplyvňuje transport sedimentov. Hodnota tejto veličiny závisí od lokálnych hydraulických podmienok (rýchlosť prúdenia a hĺbka vody) a lokálnych materiálových charakteristík (reprezentovaných koeficientom drsnosti). Pri prekročení kritickej hodnoty šmykového napätia (pre danú veľkosť zrna dnového materiálu) dochádza k pohybu sedimentov vodného toku, resp. môže dôjsť k porušeniu stability vrstvy vodou obtekaného materiálu. Kategorizácia hodnôt kritického šmykového napätia v závislosti od granulometrických charakteristík dnového materiálu (Julien, 2002) je uvedená v tabuľke 3.1.2.

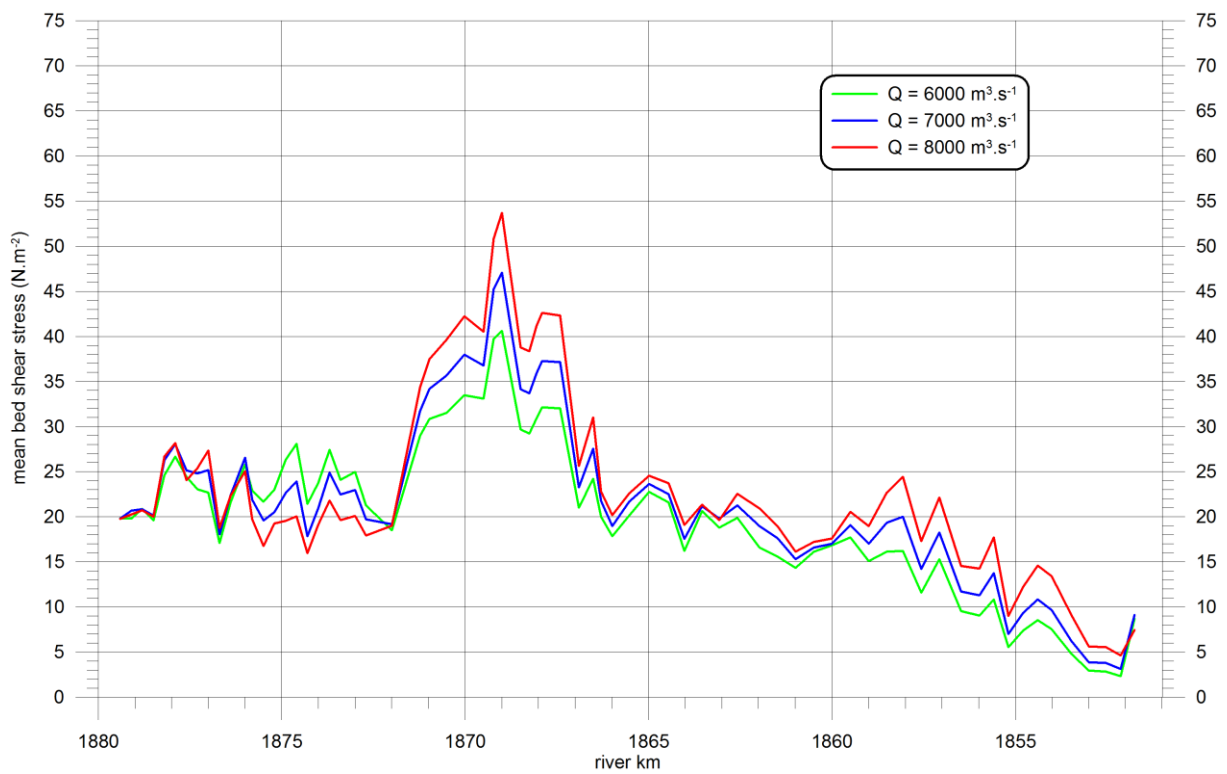
Tab. 3.1.2: Kritické šmykové napätie pri dne v závislosti od granulometrického zloženia dnových sedimentov – vybrané hodnoty

<i>Trieda sedimentov</i>	<i>priemer častíc D (mm)</i>	<i>Kritické šmykové napätie pri dne τ_c (N.m⁻²)</i>
<i>Jemné valúny</i>	64 – 128	53,8 – 112
<i>Veľmi hrubý štrk</i>	32 – 64	25,9 – 53,8
<i>Hrubý štrk</i>	16 – 32	12,2 – 25,9
<i>Stredný štrk</i>	8 – 16	5,7 – 12,2
<i>Jemný štrk</i>	4 – 8	2,7 – 5,7
<i>Veľmi jemný štrk</i>	2 – 4	1,3 – 2,7
<i>Veľmi hrubý piesok</i>	1 - 2	0,47 – 1,3

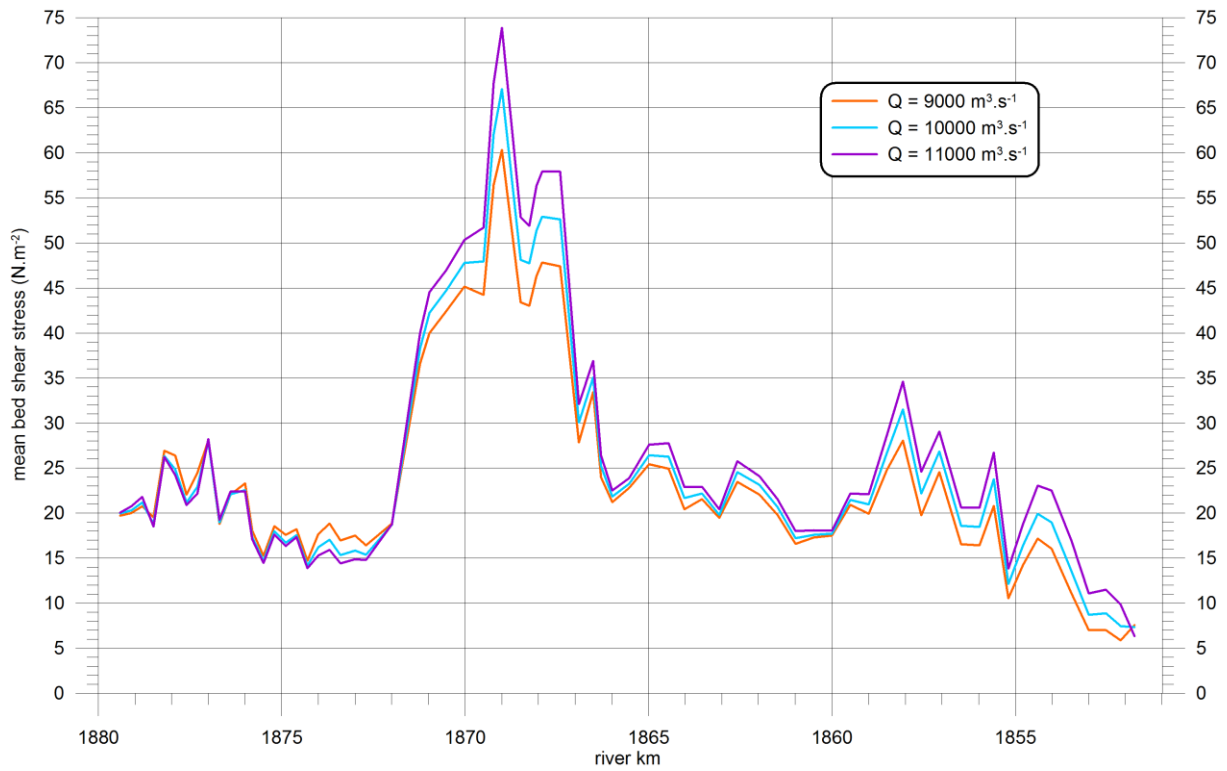
Pozdĺžne profily modelom 2020 simulovaných priemerných hodnôt šmykového napätia pri dne koryta Dunaja na úseku medzi Devínom a Čunovom sú na obrázkoch 3.1.8-3.1.10. Vyhodnotené boli prietokové situácie od nízkej regulačnej plavebnej vody po vysokú plavebnú vodu za predpokladu bežných prevádzkových hladín (130,10-131,10 m n.m.) na objektoch SVD v Čunove. V grafoch sú kvôli prehľadnosti zobrazené len situácie pre minimálnu prevádzkovú hladinu. Z obrázku je zrejma primárna závislosť šmykového napätia od hodnôt priemernej profilovej rýchlosti prúdenia vody. Pribeh pozdĺžnych profilov šmykového napätia pri dne je analogický s priebehom pozdĺžnych profilov rýchlosti prúdenia.



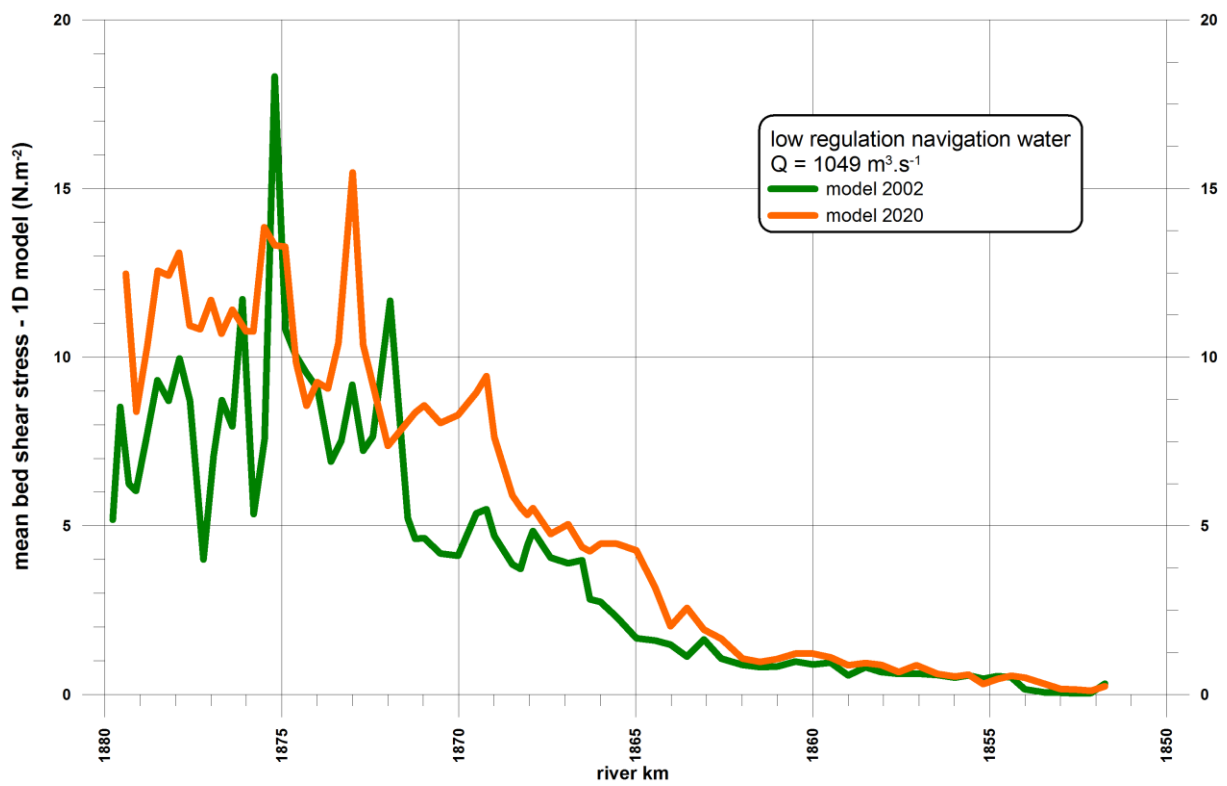
Obr. 3.1.8: Priemerné šmykové napätie simulované modelom 2020, prietoky do vysokej plavebnej vody



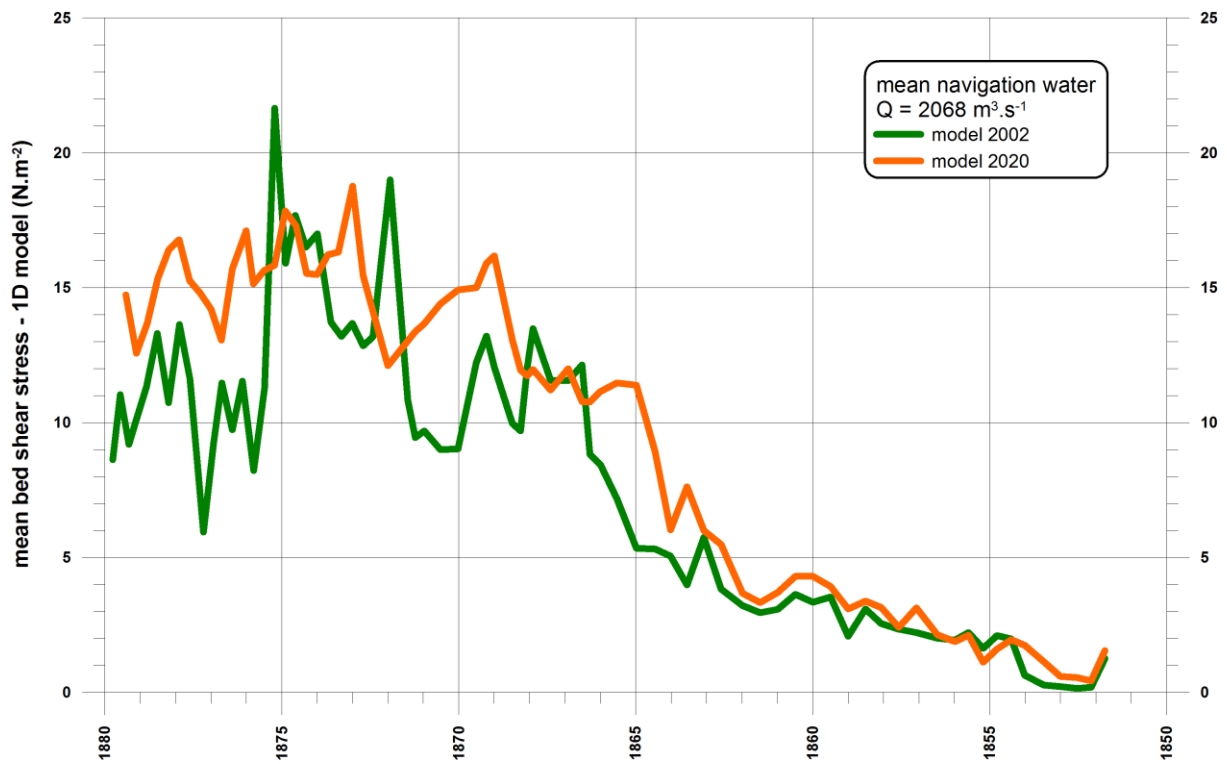
Obr. 3.1.9: Priemerné šmykové napätie simulované modelom 2020, povodňové prietoky – časť 1



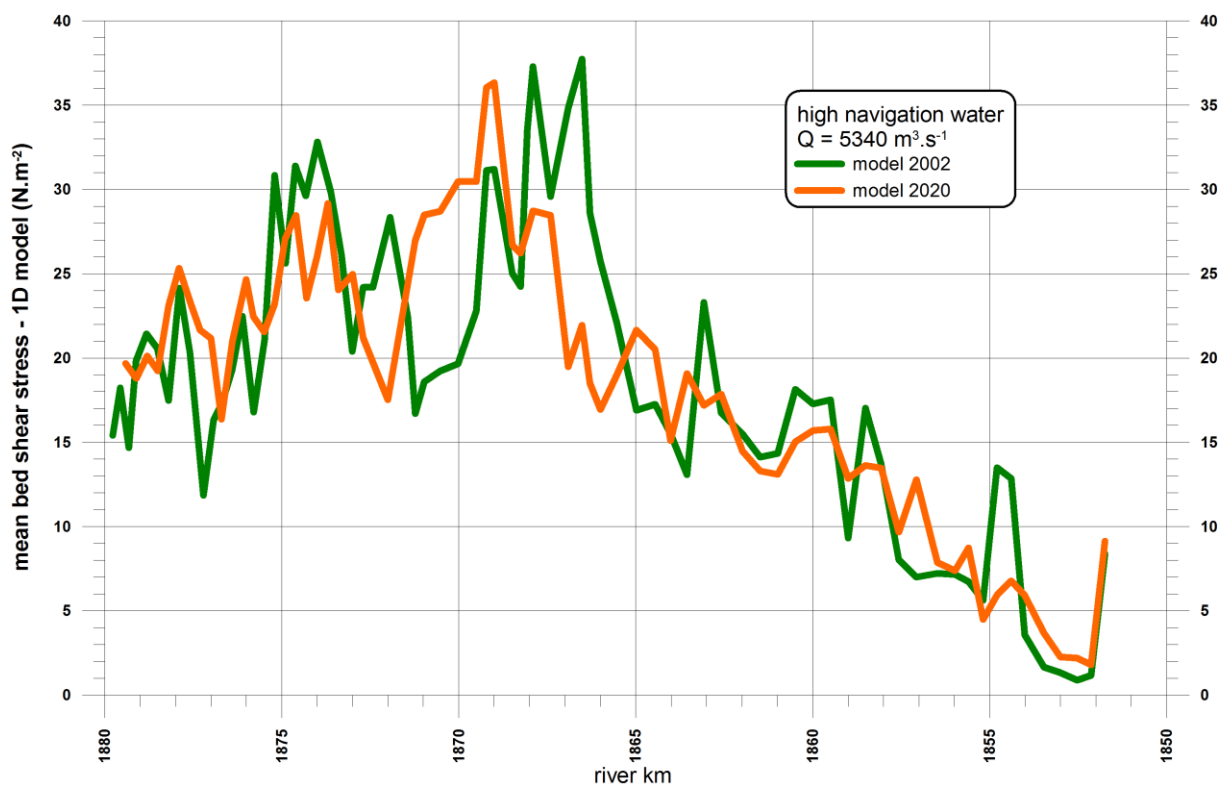
Obr. 3.1.10: Priemerné šmykové napätie simulované modelom 2020, povodňové prietoky – časť 2



Obr. 3.1.11: Porovnanie priemerného šmykového napätia simulovaného modelmi 2002 a 2020 – nízka regulačná plavebná voda



Obr. 3.1.12: Porovnanie priemerného šmykového napätia simulovaného modelmi 2002 a 2020 – stredná plavebná voda



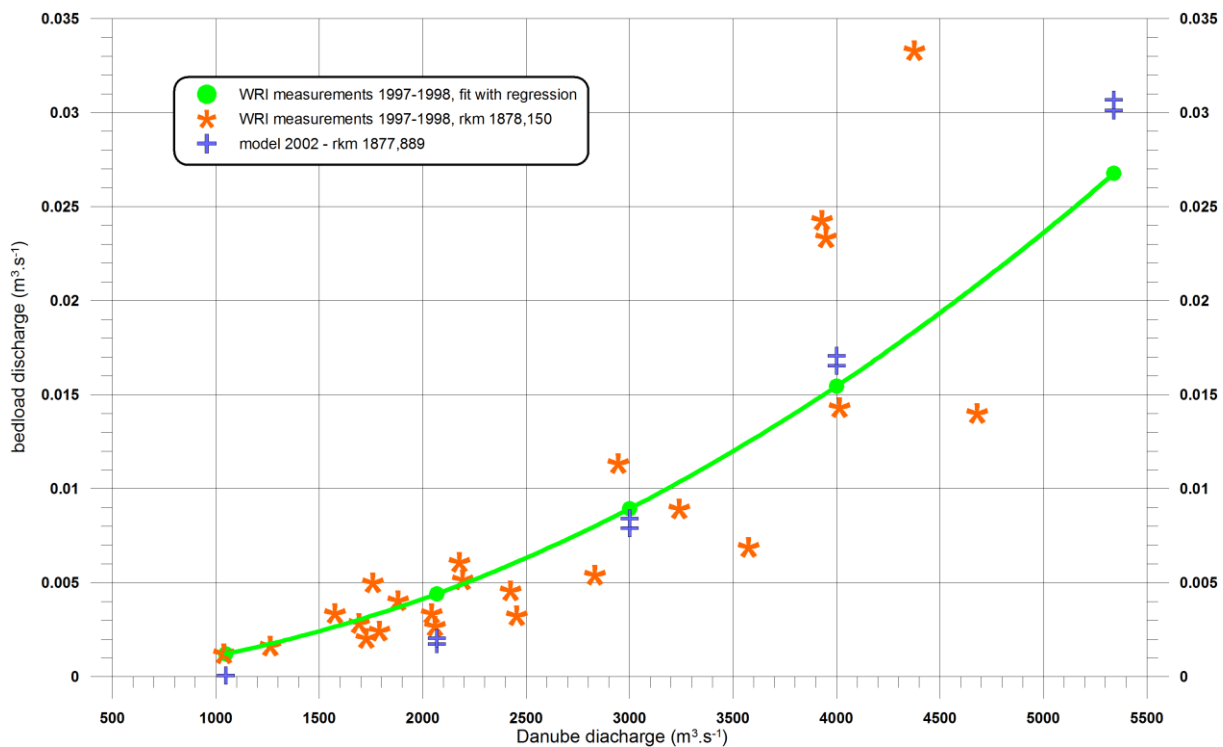
Obr. 3.1.13: Porovnanie priemerného šmykového napätia simulovaného modelmi 2002 a 2020 – vysoká plavebná voda

Porovnanie výsledkov simulácií s modelmi 2002 a 2020 je na obrázkoch 3.1.11-3.1.13. Porovnáваме tu simulované priemerné šmykové napätie pri dne Dunaja. Pri nízkej regulačnej a strednej plavebnej vode je úsek maximálnych hodnôt medzi profilmi pf15 a pf25, t.j. na úseku rkm 1876,0-1873,0. Absolútne maximum šmykového napätia pri dne $\tau_{\max}=37,8 \text{ N.m}^{-2}$ v profile pf23 zodpovedá vysokej plavebnej vode, pričom ďalšie výrazné lokálne maximum $\tau \approx 35,7 \text{ N.m}^{-2}$ zodpovedá profilu pf36 (rkm 1869) tesne pod mostom SNP. Hodnoty väčšie ako $\tau=25 \text{ N.m}^{-2}$, ktoré približne zodpovedajú dolnej hranici kritického šmykového napätia pre veľmi hrubý štrk (tab. 3.1.2), boli modelom 2018 simulované pri vysokej plavebnej vode aj pod Devínom medzi rkm 1879-1877 (tu boli realizované priame merania transportu splavenín) a tiež na takmer celom úseku medzi profilmi pf18 a pf47 (rkm 1875,200-1864,985), t.j. od Wolfsthalu, cez centrum mesta až po Ovsíšte. Smerom k objektom SVD v Čunove hodnoty simulovaného šmykového napätia pri dne koryta Dunaja postupne klesajú, čo je dôsledkom vzdutia vody a klesajúcich rýchlostí prúdenia v zdrži Hrušov. Minimálne, takmer nulové hodnoty priemerného šmykového napätia pri dne boli simulované v profile pf74 (rkm 1852,135). Analogicky k priebehu rýchlostí prúdenia vody sa šmykové napätie pri dne zdrže výrazne zvyšuje pri galérii Danubiana.

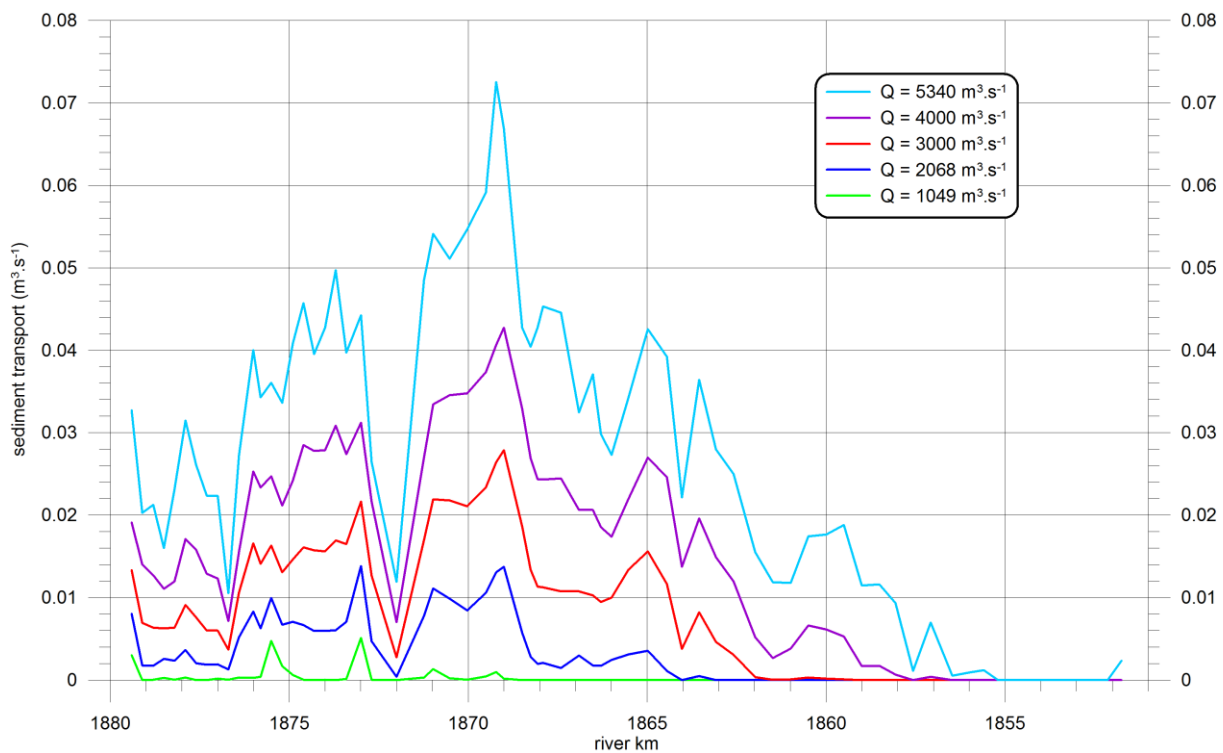
Pri prietoku vysokej plavebnej vody je podľa výsledkov modelu pre súčasný stav prekročená horná hranica kritického šmykového napätia pre hrubý štrk ($25,9 \text{ N.m}^{-2}$) z tabuľky 3.1.2 v 28-ich profiloch na úseku medzi rkm 1879,000 a 1864,500. Teoreticky vhodné podmienky pre pohyb stredného štrku (horná hranica kritického šmykového napätia $12,2 \text{ N.m}^{-2}$) sú pri tomto prietoku až po rkm 1857, teda aj na konci zdrže.

Dôležitú úlohu pri simuláciách transportu sedimentov zohráva výber teoretického vzťahu pre transport sedimentov. V našom prípade boli testované tri teoretické vzťahy – vzorec Ackersa a Whitea, vzorec Engelunda a Hansena a vzorec Sata a kol. Simulované hodnoty transportu sedimentov sme porovnávali s výsledkami priamych terénnych meraní transportu sedimentov. Niekoľko priamych terénnych meraní bolo v minulosti realizovaných v rkm 1878,150, pod Devínom (Holubová a kol., 1998). Prietok Dunaja počas meraní sa pohyboval v intervale $1000\text{-}4700 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledky týchto meraní boli porovnané s modelovými simuláciami. Výsledkom porovnania bol záver, že teoretický vzorec podľa Sata a kol. najlepšie zodpovedá

terénnym meraniam. Porovnanie meraného a modelovaného prietoku sedimentov (splavenín) je na obrázku 3.1.14.

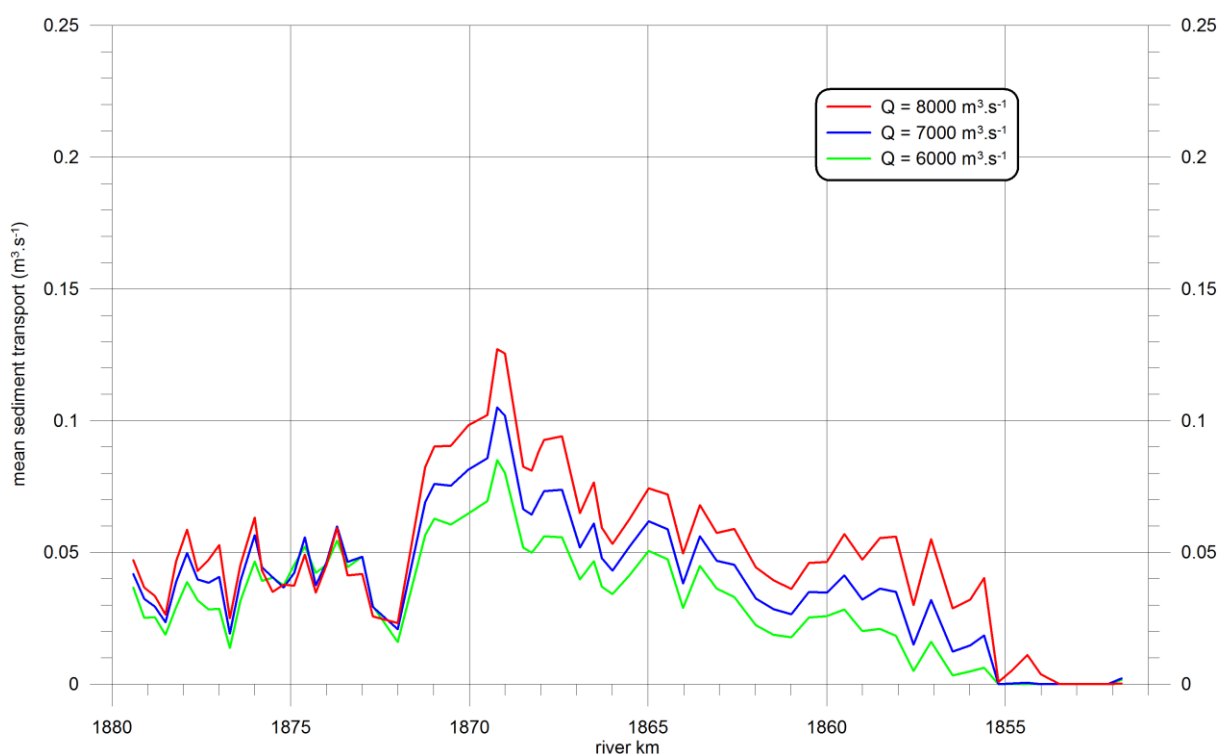


Obr. 3.1.14: Porovnanie meraného prietoku sedimentov so simulovanými hodnotami v profile terénnych meraní VÚVH

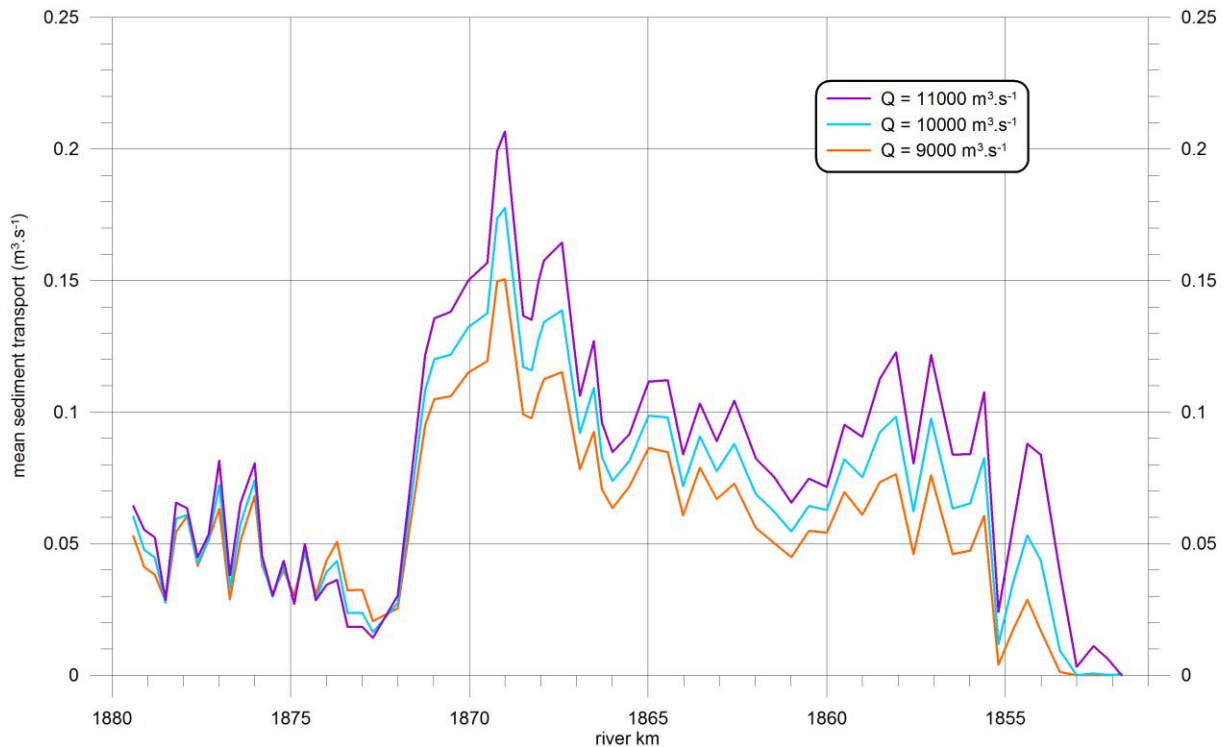


Obr. 3.1.15: Simulovaný transport sedimentov Dunaja, úsek Devín-Čunovo, model 2020

Výsledkom simulácií boli hodnoty transportu sedimentov (prietoku splavenín) podľa vzťahu Sata a kol. Pozdĺžny profil transportu sedimentov pre prietoky od nízkej regulačnej plavebnej vody po vysokú plavebnú vodu je na obrázku 3.1.15. Maximálna hodnota transportu sedimentov dosahuje $0,072 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pri vysokej plavebnej vode v rkm 1869. Ďalšie významné lokálne maximum, približne $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sa nachádza v rkm 1873,5. Pri vysokej plavebnej vode je transport sedimentov aktívny na takmer celom úseku Dunaja medzi Devínom a Čunovom. Zastavuje sa pri rkm 1855,0. Pri prietoku $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, maximum transportu sedimentov dosahuje približne $0,042 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a zastavuje sa pri rkm 1857,8. Pri prietoku $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, maximum transportu sedimentov dosahuje približne $0,027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a zastavuje sa pri rkm 1862. Maximálny prietok sedimentov pri prietoku strednej plavebnej vody je približne $0,014 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a je aktívny po rkm 1864,0. Transport sedimentov je nulový pri nízkej regulačnej plavebnej vode na takmer celom úseku rieky medzi Devínom a Čunovom, s výnimkou niekoľkých krátkych čiastkových medzi Devínom a rkm 1869. Prietok približne $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ možno považovať za prietok zodpovedajúci začiatku transportu sedimentov na skúmanom úseku Dunaja.



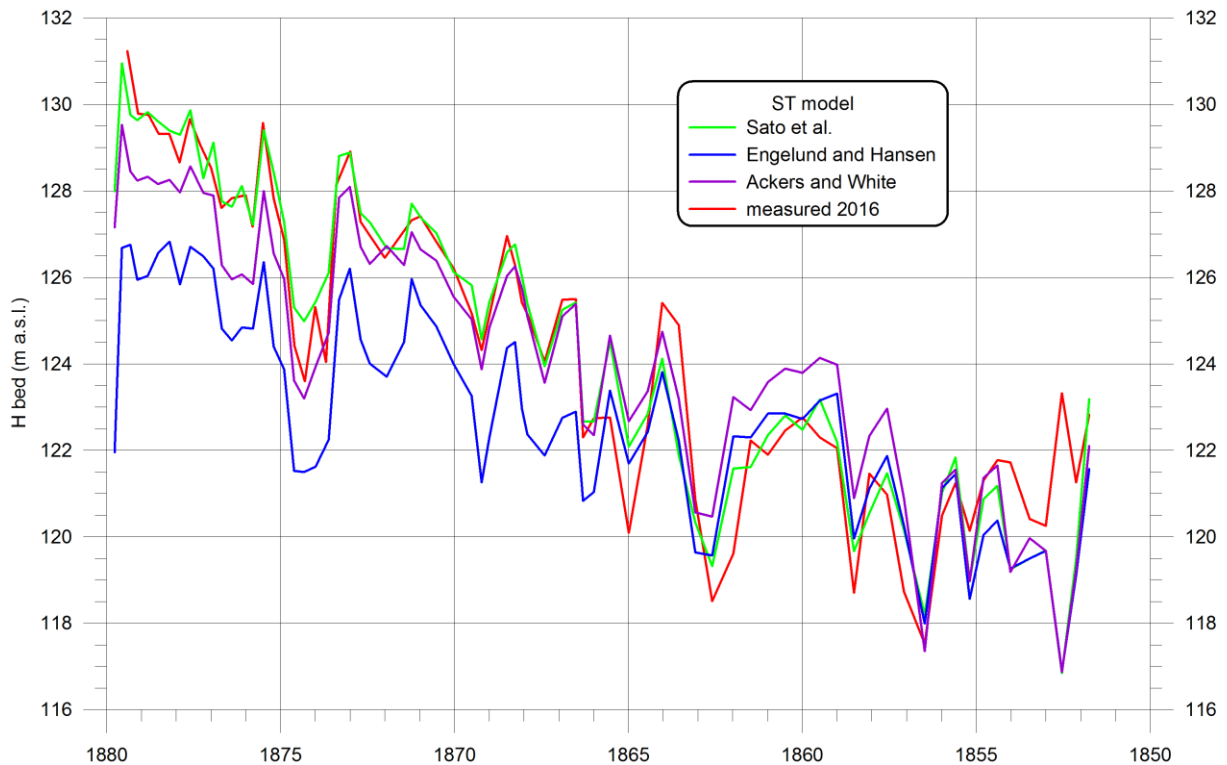
Obr. 3.1.16: Simulovaný transport sedimentov Dunaja, úsek Devín-Čunovo, model 2020, povodňové prietoky – časť 1



Obr. 3.1.17: Simulovaný transport sedimentov Dunaja, úsek Devín-Čunovo, model 2020, povodňové prietoky – časť 2

Simulovaný transport sedimentov podľa vzťahu Sata a kol. pre povodňové prietoky je na obrázkoch 3.1.16 a 3.1.17. Pozdĺžny profil simulovaného transportu sedimentov zodpovedá priebehu simulovaného priemerného šmykového napätia pri dne rieky. Maximálne simulované hodnoty transportu sedimentov sa koncentrujú pri moste SNP. Maximálny transport sedimentov dosahuje $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pri prietoku $Q=6000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $0,205 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pri prietoku $Q=11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v rkm 1869.

Model transportu sedimentov bol taktiež využitý pri simulovaní morfológického vývoja koryta Dunaja na úseku medzi Devínom a Čunovom. Simulovali sme časové obdobie 2001-2016, pre ktoré boli k dispozícii hydrologické a topografické dáta. Pre porovnanie sme aplikovali aj vzťahy Engelunda a Hansena a tiež Ackersa a Whitea. Výsledky morfológického modelovania sú na obrázku 3.1.18. Simulované dno rieky na konci simulácií (2016) je porovnané s meraným pozdĺžnym profilom dna koryta Dunaja.



Obr. 3.1.18: Výsledky morfologického modelovania pre rôzne vzťahy pre transport sedimentov

Z obrázku je evidentné, že model transportu sedimentov podľa Sata a kol. poskytuje najlepšie výsledky v porovnaní s dvoma zvyšnými teoretickými vťahmi. Výsledky sú oveľa lepšie pre čiastkový úsek medzi rkm 1880-1866, ako pre čiastkový úsek medzi rkm 1866-1851,750.

3.2 Matematický model koryta Dunaja medzi Sapom a Szobom

Matematický model bol zostrojený a aktualizovaný v programe HEC-RAS vyvinutom spoločnosťou U.S. Army Corps of Engineers. Pri jeho aktualizácii bola použitá verzia 6.1.0. Tento software je na trhu voľne dostupný a patrí medzi najpoužívanejšie rozhrania pre modelovanie ustáleného a neustáleného prúdenia vody v otvorených korytách v jednorozmernej i dvojrozmernej schematizácii. Na zostrojenie i aktualizáciu modelu je potrebné veľké množstvo vstupných údajov. Na spracovanie týchto dát sme použili program ArcMap.

3.2.1 Podkladové údaje pre modelovanie

Matematický model schematizuje prúdenie vody v úseku rieky Dunaj od Sapu (rkm 1811) po Szob (rkm 1708) pri rôznych hydrologických a hydraulických podmienkach. Pri jeho aktualizácii boli použité údaje rôzneho druhu:

- Topografické: digitálny model terénu a mračna bodov zamerané v koryte rieky, ktoré boli použité na odvodenie priečných profilov
- Hydrologické: časové rady pozorovaných vodných stavov a prietokov, merné krivky v určených vodomerných staniciach a pozdĺžne priebehy hladín vody pri rôznych hydrologických situáciách,
- Údaje o drsnostných pomeroch v koryte a inundačných priestoroch: polygóny s rôznymi hodnotami koeficientu drsnosti,
- Iné podkladové a vstupné údaje

3.2.2 Topografické údaje

Základným zdrojom topografických dát bol digitálny model reliéfu (DMR), ktorý poskytuje geodetický a kartografický ústav (GKÚ). Tento nám poslúžil ako zdroj údajov pre schematizáciu inundácií rieky. Pre oblasť koryta sme použili mračná bodov poskytnuté maďarskou stranou, ktoré sme pomocou interpolácie cez nepravidelnú sieť trojuholníkov (TIN) previedli na DMR. Takto upravený DMR sme použili na aktualizáciu priečných profilov v matematickom modeli.

Použitý bol starší model poskytnutý maďarskou stranou, ktorý je konštruovaný v zobrazení 1972 Egyseges Orszagos Vetületi. Samotný model obsahuje na úseku od Sapu po Szob 437 priečných profilov pričom je z toho 286 profilov na samotnom Dunaji. Hustota priečných profilov sa v rámci modelu mení a to z 500 metrov v rovných úsekoch po 250 metrov v úsekoch s bočnými ramenami. Priečne profily sú georeferencované, čo znamená že majú určenú súradnicovým systémom presnú polohu v priestore. Každý profil je zároveň vo formáte 3D línií, čo znamená že tieto nemajú iba presnú priestorovú informáciu, ale aj nevyhnutnú informáciu o nadmorskej výške.

3.2.3 Hydrologické údaje

Na zostavenie hydrodynamického modelu boli použité časové rady pozorovaných vodných stavov a prietokov v staniciach Medveďov (rkm 1806,3), Komárno (rkm 1767,8) a Štúrovo (rkm 1718,6). Taktiež sme využili merné krivky v týchto staniciach. S ohľadom na cieľ modelových simulácií sme potrebovali hodnoty prietokov nízkej regulačnej plavebnej vody (HNRPV), vysokej plavebnej vody (HVPV) a storočnej vody (HQ100). Prietoky a vodné stavy im zodpovedajúce boli odvodené na SHMÚ na základe 30-ročného obdobia pozorovania.

Na kalibráciu modelu sme použili zameraný pozdĺžny priebeh hladín vody počas situácii blízkych modelovaným stavom. Konkrétne išlo o situáciu počas povodňovej vlny z roku 2013, hladinu blízku nízkej plavebnej vode z rokov 2020 a 2021 a hladinu vysokej plavebnej vody z júla 2021.

3.2.4 Údaje o drsnostných pomeroch v koryte a inundačných priestoroch

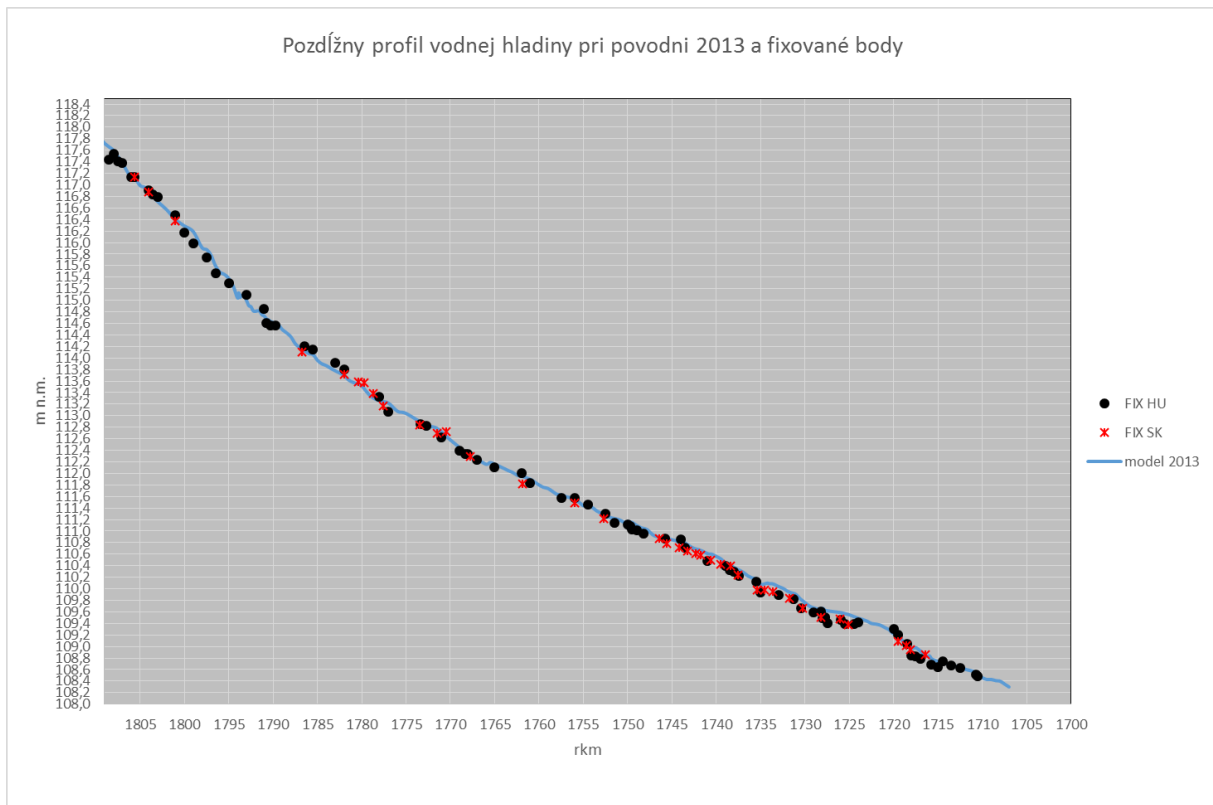
Pri schematizácii drsnostných pomerov v modeli sme využili fakt, že sme mali k dispozícii fungujúci model so staršou geometriou. Koeficienty drsnosti, ktoré v ňom boli nastavené pre prietoky blízke Q100 boli vyhovujúce. Pre prietoky zodpovedajúce hladine nízkej regulačnej plavebnej vody sme upravili Manningov súčiniteľ drsnosti pre koryto na hodnoty v rozsahu od 0.024 po 0.03 a pre inundáciu od 0.075 po 0.15 v závislosti od vegetácie, využitia územia v inundácii, ako aj výskytu lokálnych prekážok a tvarových nepravidelností koryta.

3.2.5 Iné podkladové a vstupné údaje

Medzi ďalšie údaje patrili okrajové podmienky na hornom a dolnom okraji modelu. Ako hornú okrajovú podmienku sme používali prietoky namerané vo vodomernej stanici Medveďov a ako dolnú okrajovú podmienku sme použili mernú krivku v stanici Szob. Okrem okrajových podmienok boli pri jednotlivých výpočtoch v modeli nastavené aj jeho ďalšie vstupné údaje ako počiatkové podmienky, časový interval výpočtu, veľkosť časového kroku simulácie, frekvencia zaznamenávania výsledkov a ďalšie.

3.2.6 Kalibrácia a verifikácia modelu

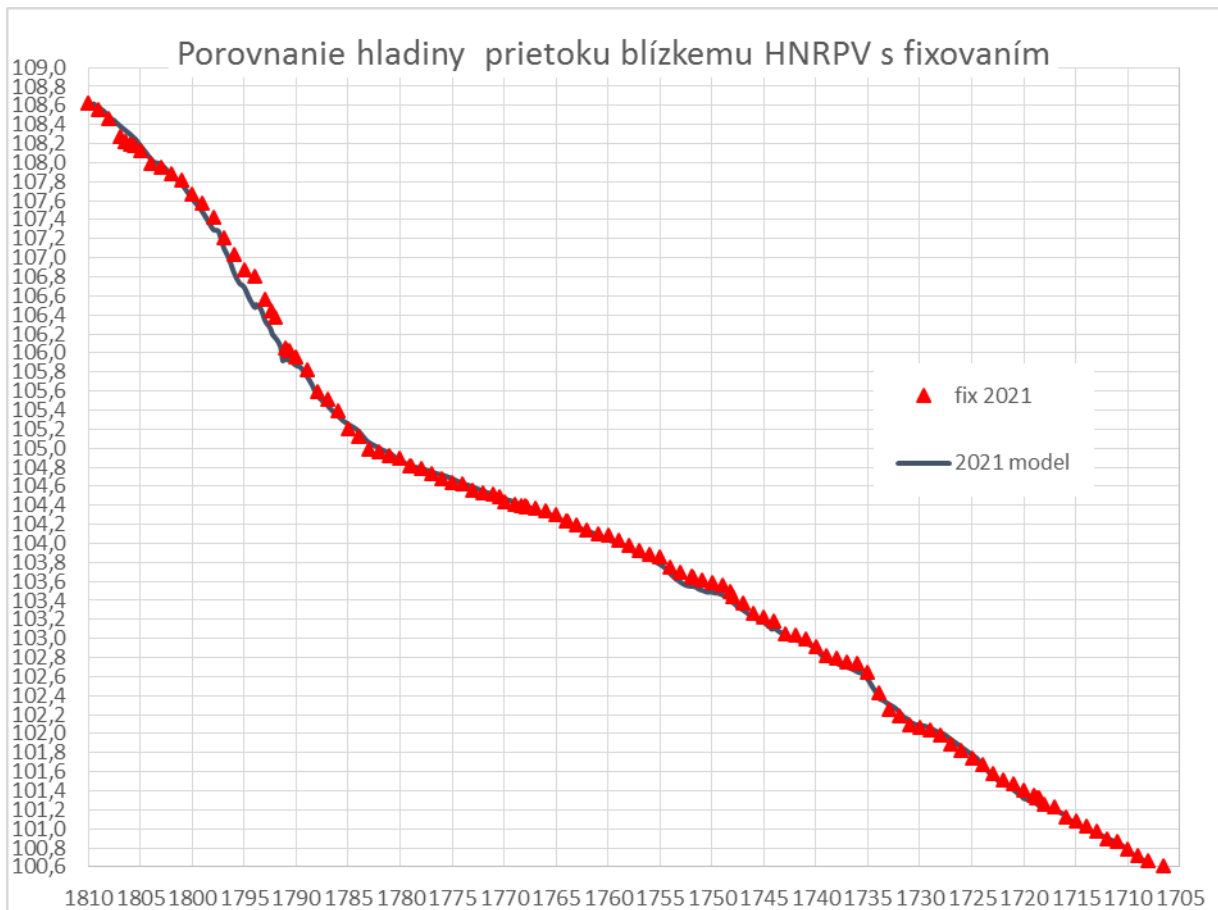
Model bol kalibrovaný na tri rôzne stavy - prietoky blízke HQ100, HVPV a HNRPV. Porovnávali sme dáta z tzv. fixovania pozdĺžneho profilu hladín vody v teréne s hladinami z modelovaných situácií. Pre kalibráciu HQ100 sme použili fixovanie (slovenské i maďarské) z povodňovej udalosti z mája a júna 2013, pri ktorej prietoky dosahovali dobu opakovania v rozmedzí $T=50-100$ rokov (obrázok 3.2.1).



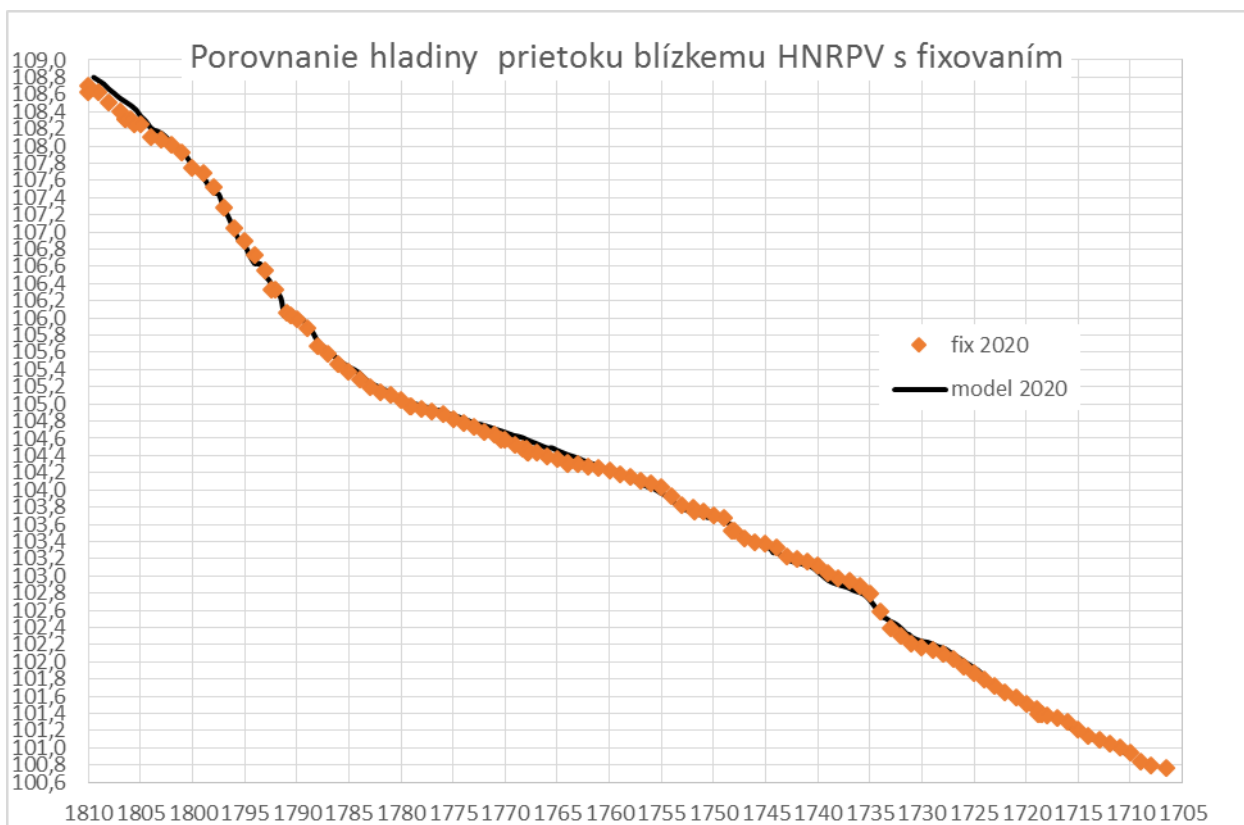
Obr. 3.2.1: Kalibrácia povodňového modelu

Z obrázku je zrejmé, že bola dosiahnutá veľká presnosť pri porovnaní výsledkov meraní so simuláciami. Rozdiely sú v prevažnej časti pozdĺžneho profilu v intervale ± 10 cm. Do úvahy je potrebné brať istú nepresnosť pri fixovaní výšky hladiny vody v teréne. Navzdory tomu model disponuje uspokojivou presnosťou a je použiteľný pre simulovanie povodňových prietokov.

Pri kalibrácii a verifikácii modelu na prietoky blízke nízkej regulačnej plavebnej vode sme postupne upravovali Manningov súčiniteľ drsnosti pre koryto, ktorý dosiahol hodnoty z intervalu $n=0.023$ až 0.028 . Kalibrácia a verifikácia prebiehala na viacerých prietokových udalostiach z rokov 2020 a 2021. Výsledky kalibrácie a verifikácie modelu v porovnaní s hodnotami nameranými počas týchto situácií (obrázky 3.2.2 a 3.2.3) odzrkadľujú vysokú presnosť s odchýlkou do ± 10 cm pri modelovaní prietokov blízkyh nízkej regulačnej plavebnej vode.



Obr. 3.2.2: Kalbrácia modelu pre nízku plavebnú vodu



Obr. 3.2.3: Verifikácia modelu pre nízku plavebnú vodu

Na základe skôr uvedených skutočností možno konštatovať, že model bol spoľahlivo kalibrovaný a verifikovaný pre široký rozsah prietokov od nízkej regulačnej plavebnej vody až po prietoky blízke Q100 a je možné ho použiť na prepočet hladín smerodajných prietokov na slovensko-maďarskom úseku Dunaja.

3.2.7 Prepočet hladín smerodajných prietokov

Pravidelnou úlohou bilaterálnej slovensko-maďarskej Komisie hraničných vôd je aj stanovenie smerodajných hladín Dunaja pre smerodajné prietoky. Priebeh smerodajných hladín sa pravidelne aktualizuje na základe určených smerodajných prietokov vo vybraných profiloch (tabuľka 3.2.1). Prietoky sa stanovujú dohodnutým metodickým postupom hydrologickými expertmi oboch strán z časových radov pozorovaných prietokov vo vodomerných staniaciach. Našou úlohou bolo prepočítať priebeh hladín pre smerodajné prietoky zodpovedajúce storočnej vode, vysokej plavebnej vode a nízkej regulačnej plavebnej vode zohľadňujúc najnovšiu topografiu koryta. Hodnoty smerodajných prietokov zodpovedajúcich smerodajným vodným stavom sme dostali od SHMÚ.

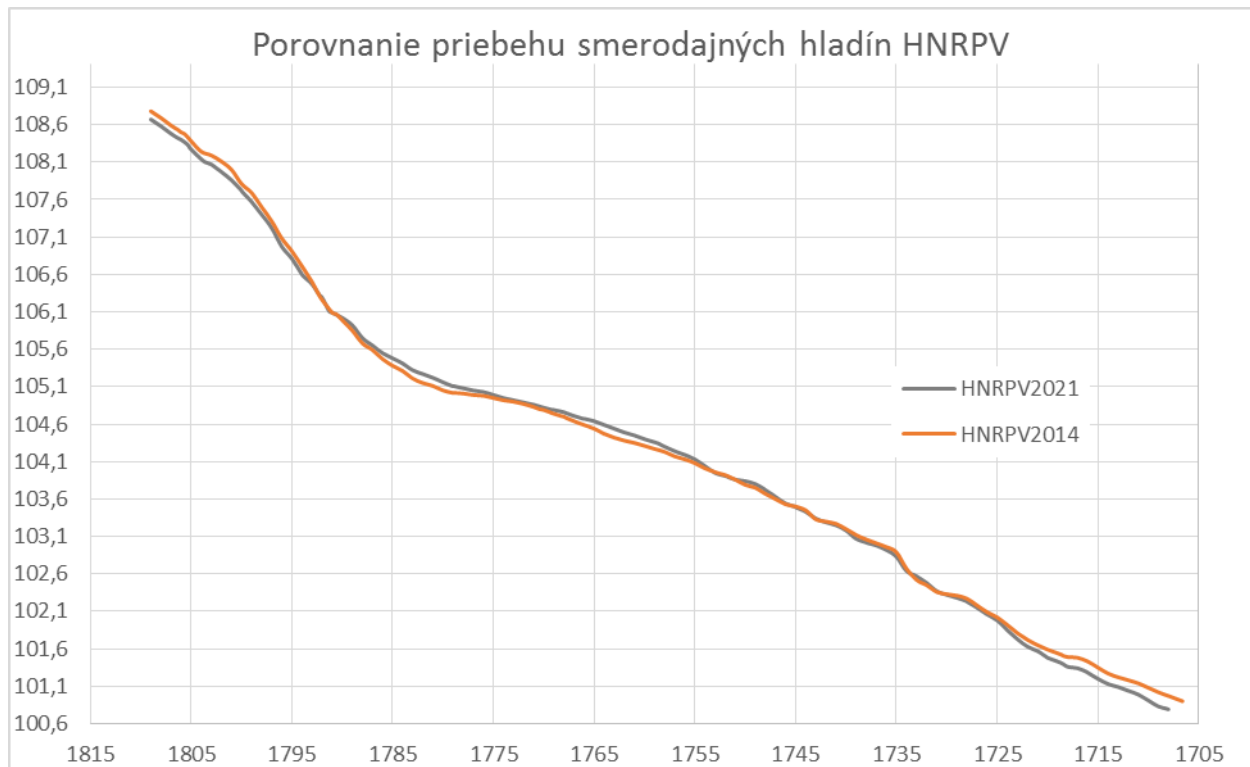
Tab. 3.2.1: Smerodajné prietoky a vodné stavy

Vodomerné stanice	Hydrologické údaje					
	N - ročné prietoky		M - denné prietoky			
	Q1% = Q100 (m ³ .s ⁻¹)	Vodný stav (cm)	Q94% = Q343 (m ³ .s ⁻¹)	Vodný stav (cm)	Q1% (m ³ .s ⁻¹)	Vodný stav (cm)
Devín	11000	996	1052	133	5976	666
Medveďov - most	10400	995	998.62	92	5586	681
Komárno - most	9650	915	1079	113	5882	638
Iža	9950	879	1177	76	6188	582
Štúrovo	9850	837	1195	53	6509	585

Nízka regulačná plavebná voda

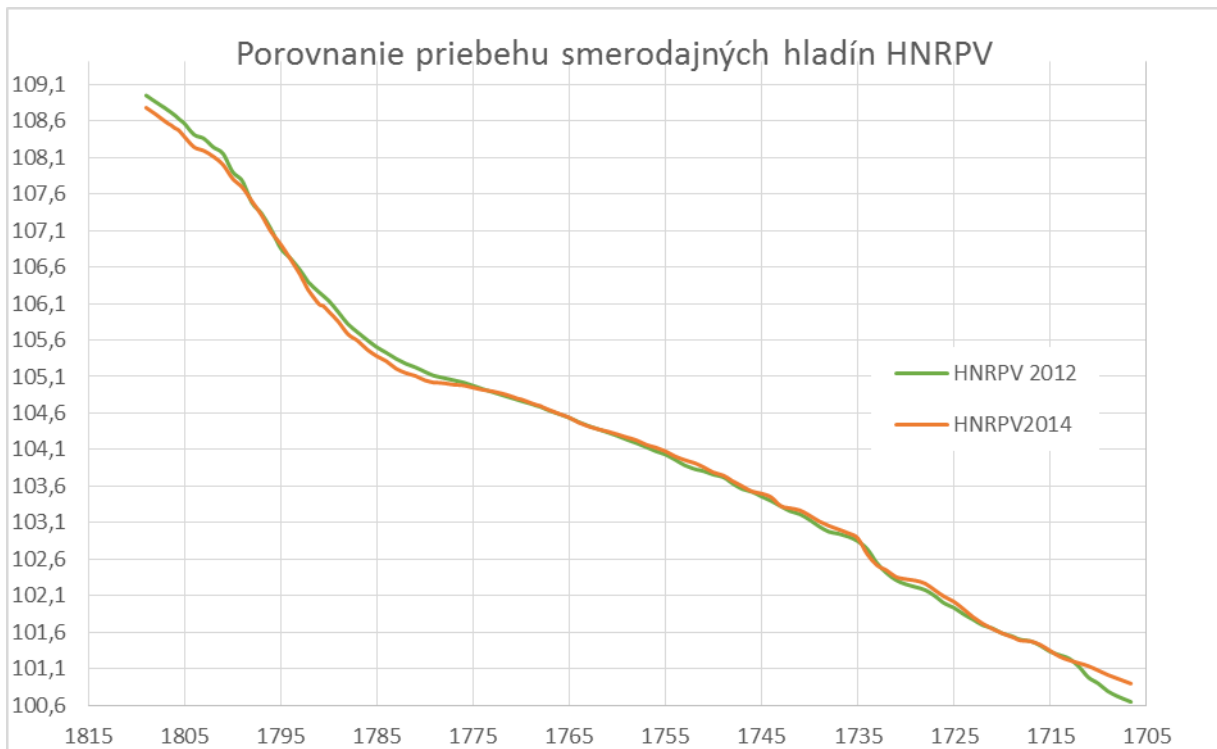
Na prepočet hladiny NRPV Dunaja v úseku Sap-Szob sa použil model s aktualizovanou topografiou koryta a novými stanovenými smerodajnými prietokmi. Naposledy sa prepočet HNRPV vykonával v roku 2014 (Holubová a kol., 2015), ktorý bral do úvahy morfológickú zmenu v koryte spôsobenú významnou povodňou z roku 2013. Na obrázku 3.2.4 môžeme vidieť porovnanie prepočtov hladín z roku 2014 a nami aktualizovaným modelom s novými smerodajnými prietokmi z roku 2021. Keď vezmeme do úvahy zmenu prietokov (obrázok 3.2.6) vo vybraných profiloch, tak

samotný priebeh hladiny zaznamenal len malú zmenu. Výnimkou je spodný úsek približne od kilometra 1720 po koniec modelu. V tejto časti je síce mierne zvýšený prietok, ale hladina je ku koncu modelu nižšie o 18 cm.



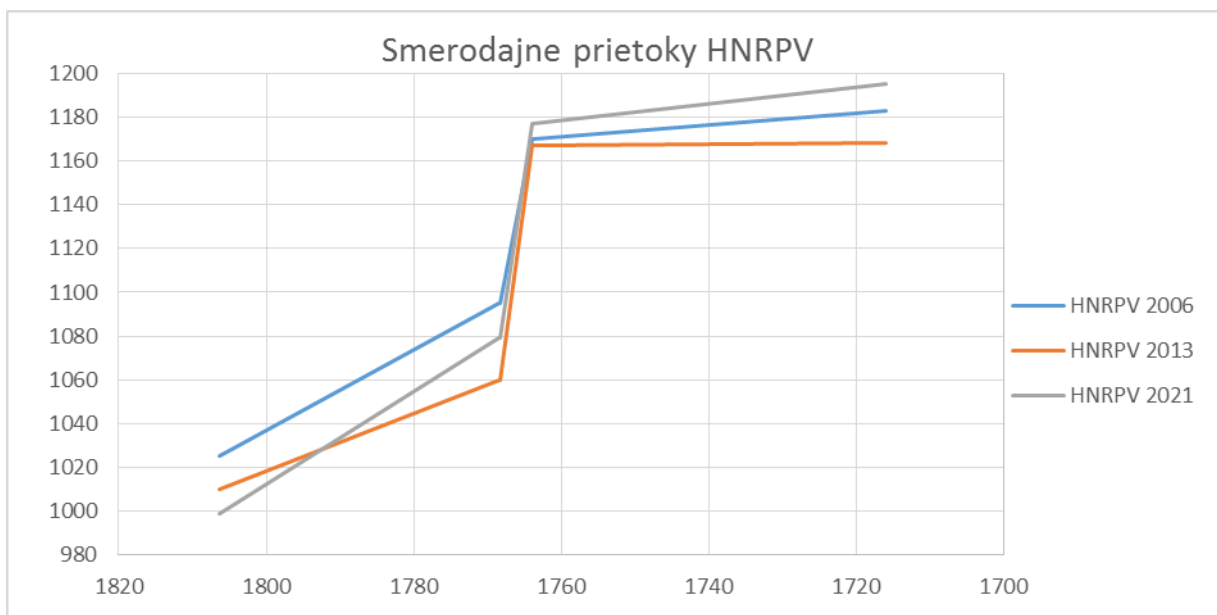
Obr. 3.2.4 : Porovnanie hladiny NRPV z rokov 2014 a 2021

Ak si všimneme porovnanie smerodajných hladín z roku 2012 spred povodne v roku 2013 a prepočtom z roku 2014 (obr. 3.2.5), môžeme vidieť zmenu v pozdĺžnom profile hladiny na začiatku modelu a na konci. To sa dá vysvetliť zmenou morfológie koryta počas povodne 2013, kde pravdepodobne došlo v hornej časti pod VD Gabčíkovo k erózii a uloženiu sedimentov medzi Medveďovom a Szobom. Tento sediment mohol byť v nasledujúcich rokoch zčasti premiestnený, čím by sa vysvetlila zmena výšky hladiny v tomto úseku.



Obr. 3.2.5: Porovnanie hladiny NRPV z rokov 2014 a 2012

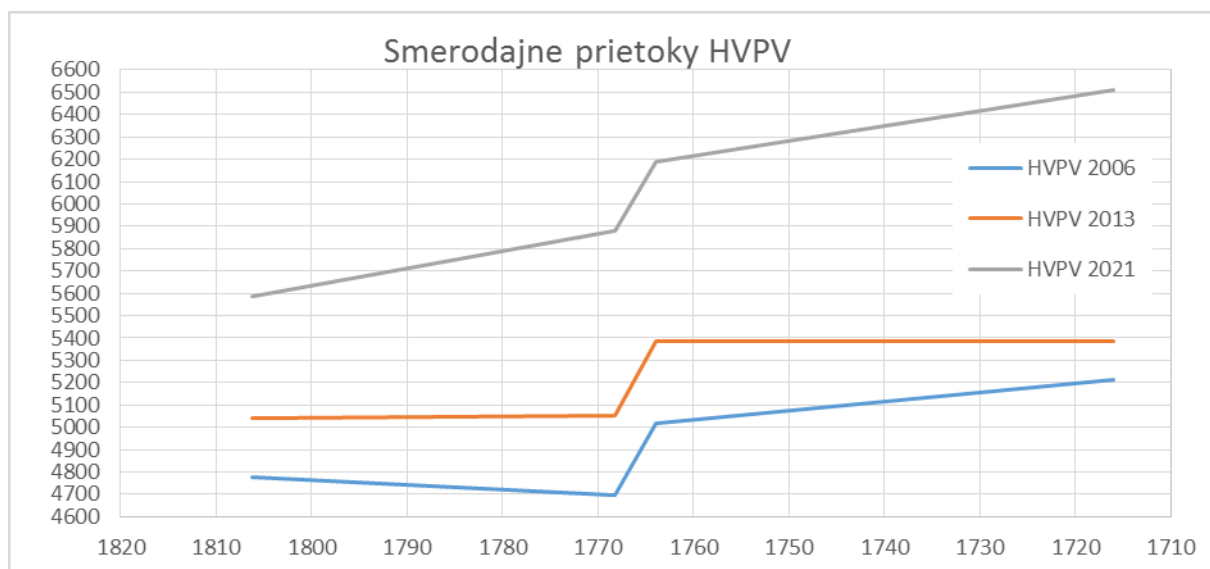
Na obrázku 3.2.6 je porovnanie smerodajných prietokov vo vybraných staniách za roky 2006, 2013 a 2021. Možeme vidieť, že zmeny v smerodajných prietokoch nie sú v čase veľké a rozdiel za posledné dve obdobia sa pohybuje od 10 do približne 30 m³.s⁻¹.



Obr. 3.2.6: Porovnanie prietokov NRPV medzi Sapom a Szobom za roky 2006-2021

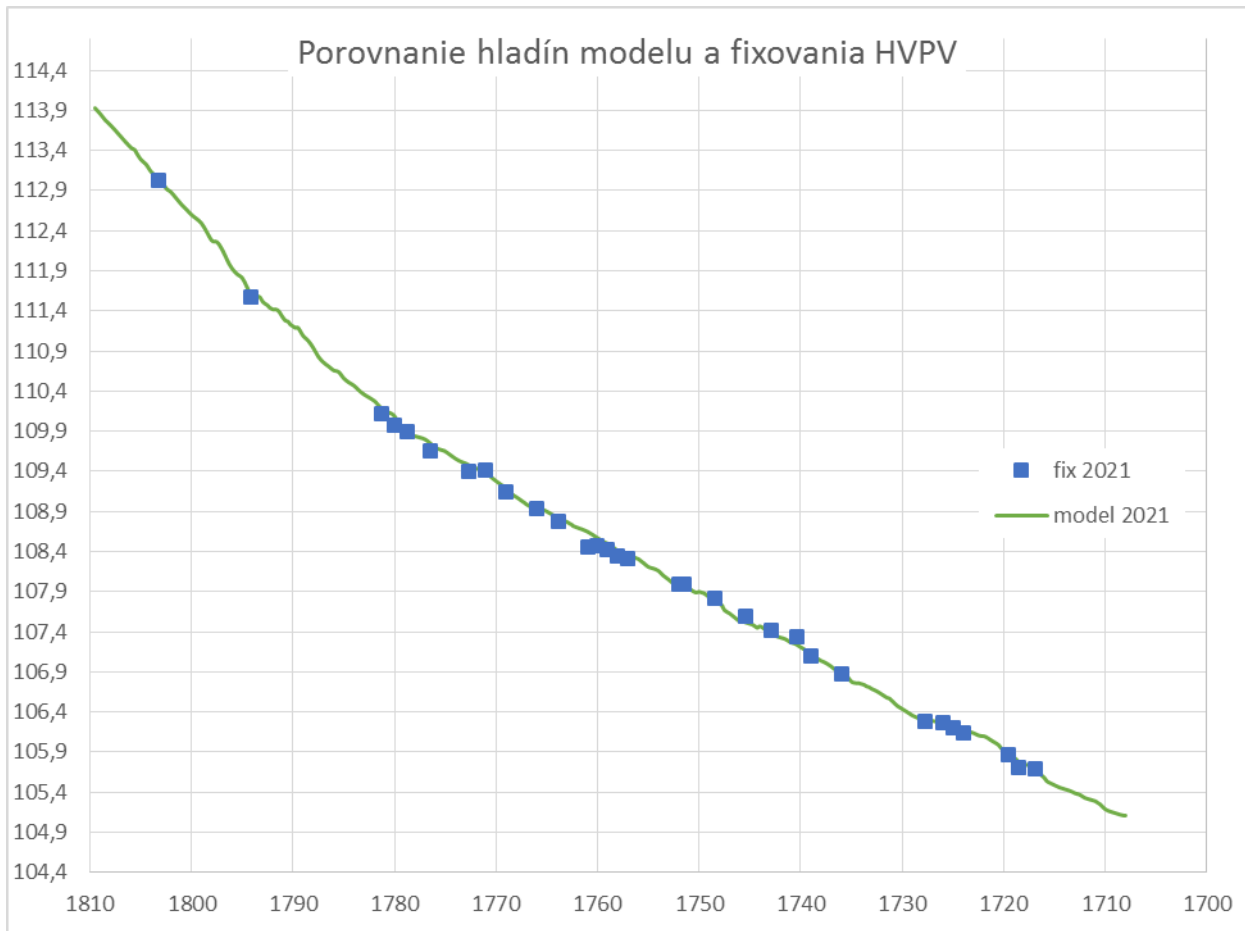
Vysoká plavebná voda

Na prepočet smerodajnej hladiny vysokej plavebnej vody bol použitý rovnaký model ako pre HNRPV, avšak bolo potrebné pri kalibrácii upraviť hodnoty Manningovho koeficientu drsnosti, ktorý dosahuje hodnoty v rozmedzí 0.024 až 0.03. Naposledy bola HVPV prepočítaná v roku 2014 (Holubová a kol., 2015) v rámci medzinárodného projektu DuReFlood. Nové prietoky zodpovedajúce HVPV za obdobie rokov 1991 – 2020 boli určené SHMÚ a oproti predošlým prietokom sú väčšie miestami o 10 až 20 percent (obrázok 3.2.7).



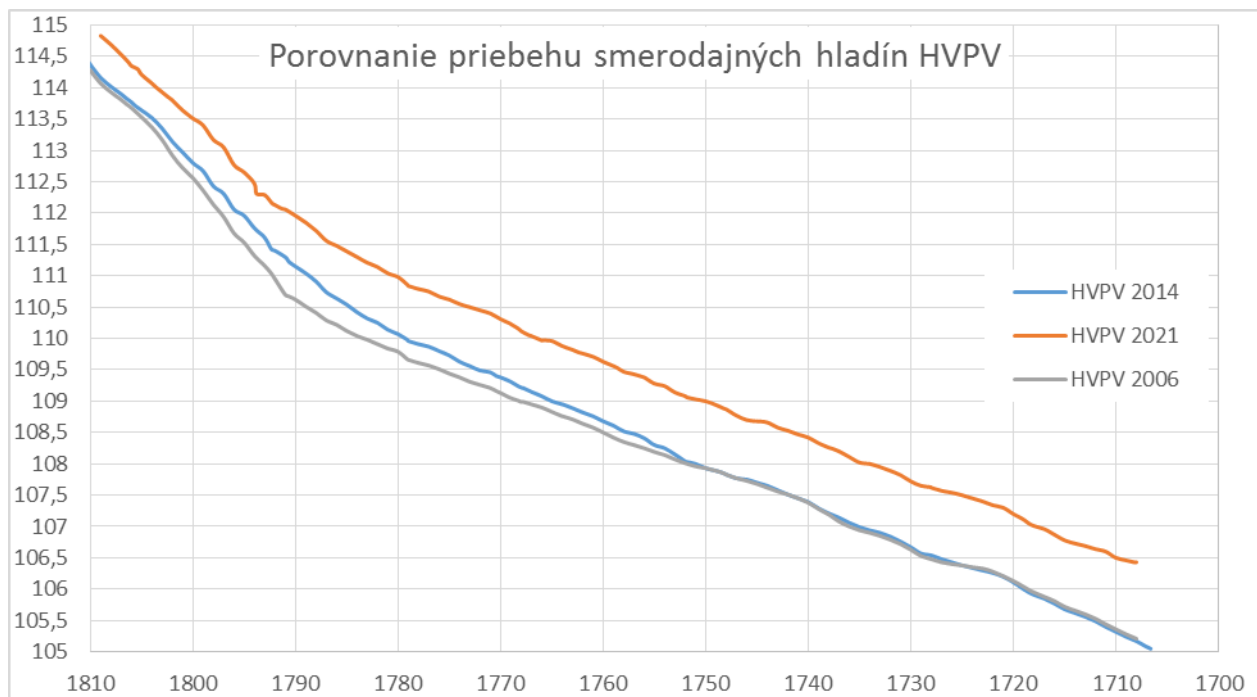
Obr. 3.2.7: Porovnanie prietokov VPV medzi Sapom a Szobom za roky 2006-2021

Model sme kalibrovali na udalosť z 21. júla 2021, kedy prietok v stanici Štúrovo dosiahol hodnotu okolo $5180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ďalej sme model kalibrovali a verifikovali na starších dátach z fixovania hladín pri prietokoch blízkych prietokom smerodajných hladín. Tieto údaje bohužiaľ zachytávali zväčša len čiastkový úsek nášho modelu a boli z obdobia rokov od 2002 do 2007. Na porovnaní priebehu hladín modelu a hodnôt počas fixovania (obrázok 3.2.8) môžeme vidieť, že modelované hodnoty s presnosťou do 10 cm zodpovedajú meraným hodnotám počas fixovania hladiny vysokej plavebnej vody v teréne.



Obr. 3.2.8: Porovnanie fixovanej a simulovanej hladiny VPV z roku 2021

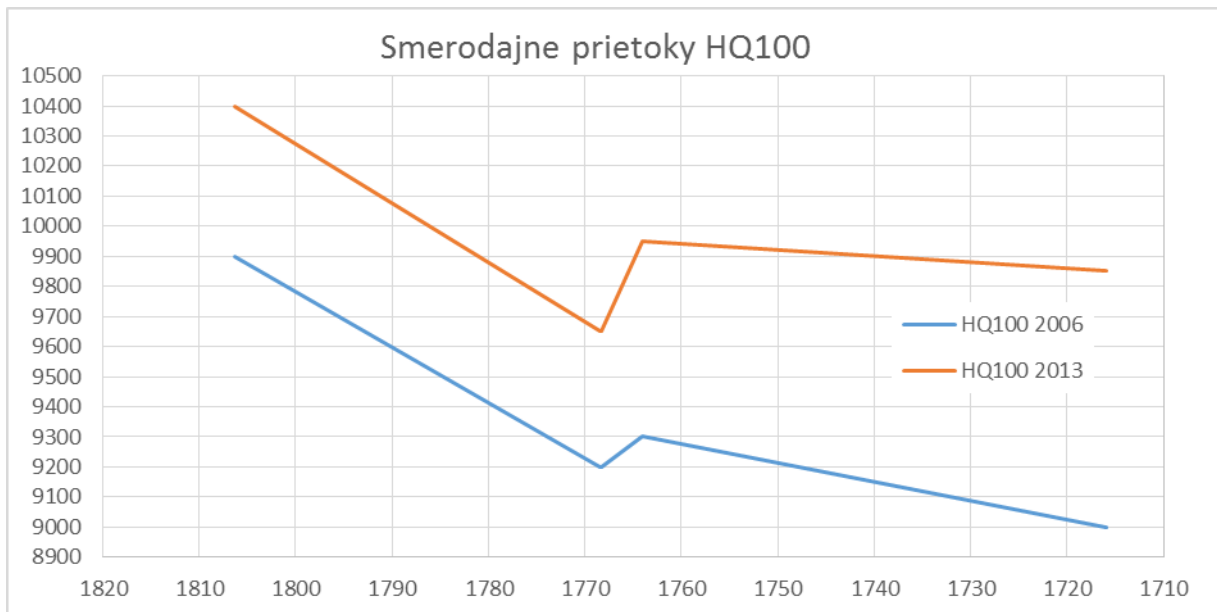
Na obrázku 3.2.9 je porovnanie priebehu hladín vysokej plavebnej vody z rokov 2006, 2014 a 2021. Na prvý pohľad je významný nárast hladiny pri novom prepočte. To zodpovedá zvýšenému prietoku v staniciach, kde ide o nárast o 546 až 1126 m³.s⁻¹.



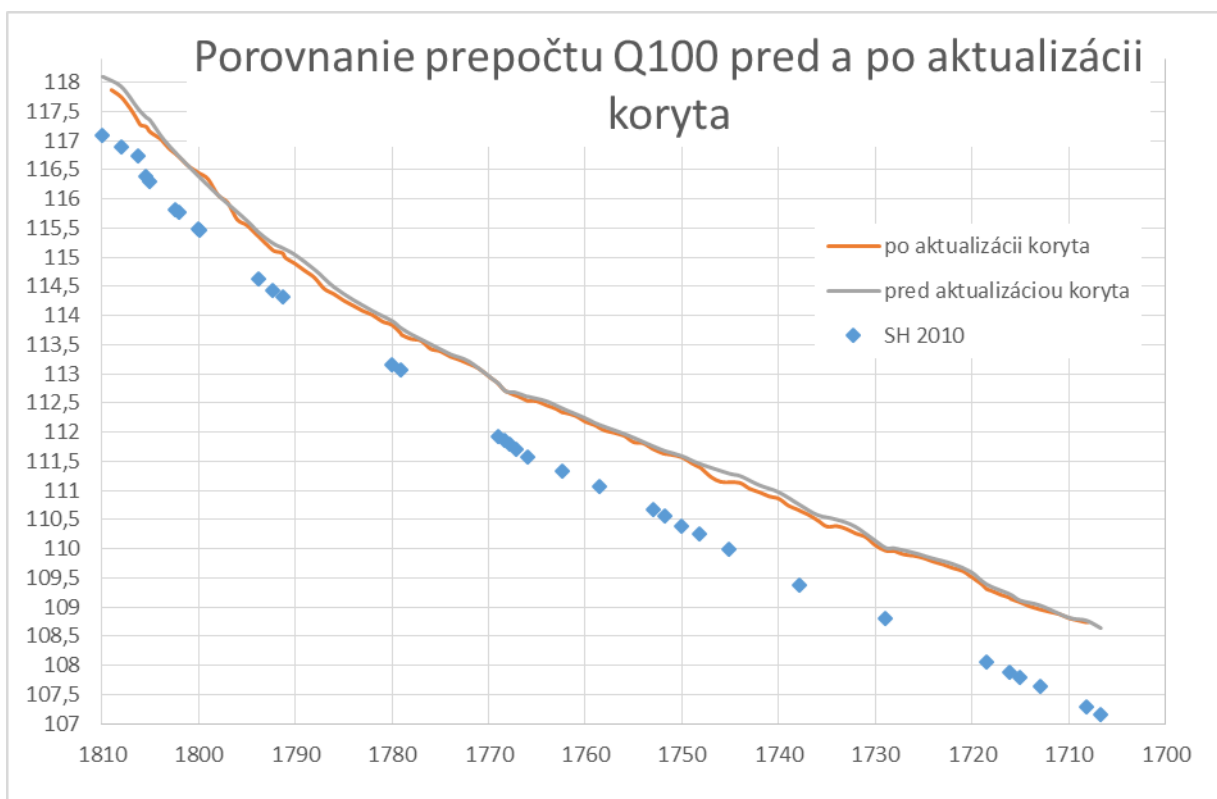
Obr. 3.2.9: Porovnanie hladiny VPV z rokov 2006, 2014 a 2021

Prepočet hladiny HQ100

Na požiadavku KHV sme pristúpili k pravidelnej aktualizácii prepočtu hladiny HQ100. Smerodajné prietoky Q100 (obrázok 3.2.10) boli odsúhlasené KHV a priebeh hladiny ktorý prepočítala maďarská strana, bol odsúhlasený ako dočasný. Zároveň sa dohodlo, že model bude aktualizovaný podľa najnovšieho zamerania topografie koryta. Takto aktualizovaným modelom sme pristúpili k samotnému prepočtu HQ 100. Ako kalibračné údaje sme použili fixovanie počas povodňovej situácie z roku 2013, odkedy sa na Dunaji nevyskytla významnejšia povodeň. Porovnanie výšky hladiny počas fixovania s modelovanou výškou hladiny môžeme vidieť na obrázku 3.2.1. Podľa obrázku model zachytáva priebeh hladiny s veľkou presnosťou a odchýlky od fixovania v teréne sú prevažne do $\pm 10\text{cm}$.



Obr. 3.2.10: Smerodajné prietoky Q100 medzi Sapom a Szobom z rokov 2006 a 2013



Obr. 3.2.11: Smerodajná hladina Q100 pred aktualizáciou koryta a po nej

V ďalšom kroku sa pristúpilo k modelovaniu samotnej hladiny Dunaja pre navrhované prietoky so štatistickou pravdepodobnosťou prekročenia 1%. Na obrázku 3.2.11 je porovnanie priebehu hladiny HQ100 vypočítanej pôvodným modelom

a modelom s aktualizovanou topografiou koryta a inundácie pomocou najnovších dát. Môžeme vidieť, že na niektorých miestach je výpočet aktualizovaným modelom mierne nižšie ako pôvodný. To môže byť spôsobené presnejšou topografiou v inundácii, ktorá je práve na týchto miestach širšia, takže má aj väčšiu kapacitu. Modrými bodmi je znázornený priebeh smerodajnej hladiny HQ100 z roku 2010. Veľké rozdiely medzi hladinou z roku 2010 a nami prepočítanou sú spôsobené väčšou zmenou v smerodajných prietokoch, ktoré sa určovali na základe modelovania prietokov maďarskou stranou. K tomuto prehodnoteniu sa pristúpilo z dôvodu výskytu významných povodní za posledné obdobie od roku 2002 do 2013, čo štatisticky znížilo pravdepodobnosť prekročenia 1%-ého prietoku. Podľa toho logicky musel byť aj samotný smerodajný prietok vo vybraných staniaciach vyšší.

4. LITERATÚRA

- Holubová, K., Capeková, Z., Lukáč, M. (2006):* Zhodnotenie vplyvu vykonaných úprav Dunaja na súčasný stav a vývoj koryta vo vzťahu k zmenám vodného režimu. Súhrnná záverečná správa. VÚVH Bratislava.
- Holubová, K., Capeková, Z., Lukáč, M., Čuban, R., Mravcová, K. (2015):* Hodnotenie vplyvu vykonaných úprav na morfológický vývoj koryta Dunaja a prehodnotenie priebehu smerodajných hladín Moravy. Priebežná správa úlohy PHÚ 2014, č. 4053, VÚVH Bratislava.
- Holubová, K., Čomaj, M., Lukáč, M., Mravcová, K., Capeková, Z., Antalová, M. (2015):* Danube floodplain rehabilitation to improve flood protection and enhance the ecological values of the river in section between Sap and Szob. Final report of the Slovak partners. Project DuReFlood HUSK/1001/2.1.0060. VÚVH Bratislava.
- Holubová, K., Szolgay, J., Lukáč, M., Capeková, Z., Matok, P., Mišík, M. (1998):* Výsledné hodnotenie režimu plavenín a splavenín Dunaja. Projekt VTP č. 95/5145/622 Výskum režimu plavenín a splavenín Dunaja v oblasti hlavného mesta v zmenených prietokových podmienkach. VÚVH Bratislava.
- Julien, P.Y. (2002):* River Mechanics. Cambridge, University Press.
- viadonau (2012):* Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2010, Österreichische Wasserstrassen- Gesellschaft mBH