

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE STAVEBNÁ
FAKULTA

Ing. Daniel Buček

Autoreferát dizertačnej práce

**Vplyv prevádzky regulačnej vodnej elektrárne
na splaveninový režim**

na získanie akademického titulu „doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe
3659 Vodohospodárske inžinierstvo

v študijnom odbore
35. Stavebníctvo

Forma štúdia
denná

Bratislava 2023

Dizertačná práca bola vypracovaná na:
Katedre hydrotechniky SvF STU v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Daniel Buček**
Katedra hydrtechniky, Stavebná fakulta STU
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Peter Šulek, PhD.**
Katedra hydrtechniky, Stavebná fakulta STU
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Peter Halaj, PhD.**
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre
Trieda Andreja Hlinku 2, 949 76 Nitra

Ing. Martin Mišík, PhD.
DHI SLOVAKIA, s.r.o.
Hattalova 12, 831 03 Bratislava

Ing. Miroslav Lukáč, PhD.
Výskumný ústav vodného hospodárstva
Nábr. arm.gen.L. Svobodu 5, 812 49 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa: o hodine na Katedre
hydrotechniky Stavebnej fakulty STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan

Obsah

Obsah	3
Úvod.....	4
1 Regulačná prevádzka vodnej elektrárne.....	4
2 Plavebná prevádzka.....	6
2.1 Interakcia prevádzky VEGA a plavebnej prevádzky na Dunaji	6
2.2 Plavebná dráha	6
3 Ciele dizertačnej práce	6
4 Metodika postupu a metódy skúmania.....	7
4.1 Transport sedimentov	7
4.2 Procesy transportu sedimentov.....	7
4.3 Metódy výpočtu a analýza transportu sedimentov	7
4.3.1 Model DHI Mike21	8
4.3.2 Modul transportu sedimentov - Mike21 ST (sand transport).....	8
4.4 Numerický model.....	10
4.4.1 Kalibrácia hydrodynamického modelu	10
4.4.2 Kalibrácia modelu transportu sedimentov.....	11
4.5 Výber vhodnej formulácie.....	14
4.6 Neistota modelu.....	14
4.6.1 First-order second-moment (FOSM).....	15
5 Výsledky práce a diskusia	15
5.1 Objem sedimentu v plavebnej dráhe	15
5.2 Kóta dna na brode	16
5.3 Transport splavenín	17
6 Záver.....	18
7 Zoznam použitej literatúry	19
Prehľad publikačnej činnosti	20

Úvod

Interakcia prevádzky vodných stavieb s okolím je preukázateľná v mnohých ohľadoch. V prípade, že vodné dielo svojou prevádzkou mení charakter prirodzeného prietokového režimu, (t. z., že mení aj prirodzený hydrologický režim v koryte pod vodnou stavbou), je možné predpokladať vplyv týchto zmien aj na zmenu splaveninového režimu toku. To môže mať za následok morfológické zmeny v koryte, ktoré môžu mať v prípade, že koryto pod vodnou stavbou slúži ako vodná cesta, vplyv aj na parametre plavebnej dráhy. V prípade zanesenia plavebnej dráhy, môžu mať morfológické zmeny v koryte zásadný vplyv nie len na plynulosť, ale aj bezpečnosť plavby. Práca preto skúma vplyv regulačnej prevádzky vodnej elektrárne (VE) na splaveninový režim toku pod VE v súvislosti s morfológickým vývojom koryta a jeho vplyvom na parametre plavebnej dráhy. Výskum je aplikovaný na úsek Dunaja pod Vodnou elektrárnou Gabčíkovo (VEGA), v úseku medzi Sapom (rkm 1810) a Klížskou Nemou (rkm 1791), na ktorom boli v minulosti realizované rozsiahle merania toku splavenín a granulometrie. Práca je špecificky zameraná na interakciu medzi prietokom na regulačnej vodnej elektrárni a morfológickým vývojom na jednom z problematických úsekov plavebnej dráhy (brod na rkm 1799). Morfológický vývoj dna v plavebnej dráhe je simulovaný na 2D matematickom modeli spoločnosti DHI, Mike21. Kalibrácia modelu prebiehala v dvoch fázach. V prvej fáze bol model kalibrovaný ako čisto hydrodynamický pomocou hydraulického drsnosti na hladinu v dvoch vodočerných staniách (Medveďov a Klížska Nema). V druhej fáze bol hydrodynamický model rozšírený o modul transportu sedimentov a kalibrovaný na merané hodnoty toku splavenín. V rámci kalibrácie boli zohľadnené a otestované na vhodnosť všetky v Mike21 implementované transportné rovnice. Najvýkonnejší model bol použitý na výpočet toku splavenín a morfológického vývoja koryta pri dvoch zásadne odlišných typoch prevádzky VE; prietocnej a regulačnej. Pre oba typy prevádzky bola vykonaná analýza neistôt s 95% predikčným intervalom metódou FOSM. Vplyv regulačnej prevádzky VE bol vyhodnotený porovnaním morfológických zmien vyvolaných regulačnou prevádzkou a prietocnou prevádzkou.

1 Regulačná prevádzka vodnej elektrárne

Regulačné vodné elektrárne sú kľúčové pre elektrickú sieť. Dokážu rýchlo reagovať na potrebu zmeny výkonu a prispôbujú svoj režim aktuálnym potrebám elektrickej siete. Poskytujú tak tzv. statické služby (napr. plánovanú výkonovú službu), ale aj dynamické služby (napr. preberanie strmých špičiek, výkonovú zálohu a pod.). Keďže v rieke je obvykle momentálny prietok menší ako celková kapacita turbín vodnej elektrárne, plný výkon je možné dosiahnuť len využívaním vody zo zásobného objemu nádrže alebo zdrže. V takom prípade je prietok regulovaný. Preto takúto vodnú elektráreň zaraďujeme medzi regulačné vodné elektrárne. Najväčšou kanálovou vodnou elektrárnou na Slovensku je Vodná elektráreň Gabčíkovo. Jej inštalovaný výkon 720 MW bol stanovený s ohľadom na v pôvodnom projekte Sústavy vodných diel Gabčíkovo – Nagymaros (SVD G-N) pôvodne navrhovanú regulačnú - špičkovú prevádzku. Celková inštalovaná kapacita turbín (4 000 m³/s, resp. pri prehltení 5 000 m³/s) zodpovedá tomuto typu prevádzky (HYDROCONSULT BRATISLAVA, 1994). VEGA, ako naša najväčšia vodná elektráreň z hľadiska výroby elektrickej energie, si zaslúži osobitnú pozornosť. Neuskutočnenie výstavby SVD G-N podľa pôvodného zmluvného projektu (najmä neuskutočnená vyrovnávací zdrž, ktorá mala vzniknúť v rámci stupňa Nagymaros) neumožňuje realizáciu pôvodne navrhovanej špičkovej prevádzky VE Gabčíkovo. Aktuálna prevádzka VEGA je prietocná – nepracuje v špičkách. V rámci prietocnej prevádzky môžu byť všetky agregáty využité naraz len vo výnimočných prípadoch, konkrétne pri povodňových prietokoch nad 4 000 m³/s. Využitie rozsahu výkonov hydroagregátov je preto v porovnaní s plánovaným stavom v zmluvnom projekte značne obmedzené (Dušička, Šulek, 2009).

Špecifickým typom regulačnej prevádzky je tzv. "pološpičková prevádzka". Oproti „klasickému“ špičkovej prevádzke, pri ktorej VE pracuje v čase potreby elektrickej energie (v čase tzv. špičky) na plný výkon a v čase mimo špičky na nulový výkon, ide o typ prevádzky, pri ktorej sa prostredníctvom zásobného objemu zdrže nad VD reguluje prirodzený prítok do zdrže, tak, že

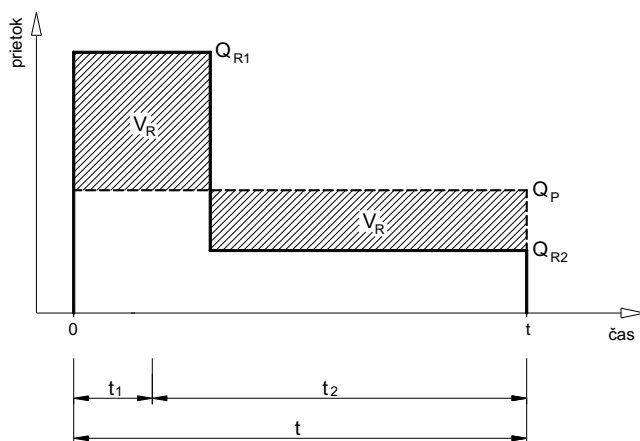
prevádzka VE je rozdelená počas dňa na dva resp. viac časových úsekov, v ktorých VE pracuje z prerozdeleným prietokom tak, že v časti/ach dňa pracuje na vyšší a v časti/ach dňa na nižší výkon. Tento typ prevádzky je kompromisom medzi pôvodne navrhovanou špičkovou prevádzkou a vynútenou prietočnou prevádzkou (t. j. prevádzkou na cca. konštantný výkon/prietok počas dňa), pričom by sa ale musela pološpičková prevádzka VEGA prispôsobiť súčasným parametrom VDG, a to najmä obmedzeniu plánovaného zásobného objemu zdrže nad VD a nedobudovaniu vyrovnávacej nádrže pod VD (Dušička, Šulek, 2009).

V zmysle vyššie uvedeného je pološpičková prevádzka VEGA limitovaná nie len existujúcim zásobným objemom zdrže Hrušov, ale aj faktom, že pod Stupňom Gabčíkovo (StG) neexistuje vyrovnávacia zdrž, ktorá by eliminovala nepriaznivý vplyv umelého kolísania prietokov a hladín na parametre plavebnej dráhy. VD Nagymaros malo okrem vyrovnania špičkového odtoku z VEGA zabezpečovať aj parametre plavebnej dráhy v úseku Dunaja pod Stupňom Gabčíkovo v prípade nízkych prietokov v koryte Dunaja pod StG. Nedobudovanie sústavy vodných diel Gabčíkovo – Nagymaros (SVD G-N) má za následok, že parametre plavebnej dráhy (najmä hĺbka vody v plavebnej dráhe) sú priamo ovplyvnené manipuláciou s prietokmi na VEGA. Vodné dielo Gabčíkovo (VDG), ktorého súčasťou je aj VEGA, je viacúčelovým vodným dielom. Jeho hlavnými úlohami je chrániť priľahlé územie pred povodňami, zabezpečovať predpísané odbery vody a umožňovať medzinárodnú plavbu. Využitie vodnej energie je v hierarchii dôležitosti funkcií až na ďalšom mieste, podľa Dočasného manipulačného poriadku (HYDROCONSULT BRATISLAVA, 1994), (Dušička, Šulek, 2009).

Pri pološpičkovej prevádzke VEGA, ktorá patrí medzi regulačné metódy prevádzky, dochádza oproti prietočnej prevádzke k zvýšeným hydraulickým stratám najmä v privádzači a v odpade VE. Celkové množstvo vyrobenej elektrickej energie z rovnakého množstva vody je preto menšie. Výroba energie sa však môže do určitej miery prispôsobiť potrebám elektrizačnej sústavy - napríklad sa dá prispôsobiť vopred stanoveným časovým pásmam diagramu denného zaťaženia elektrizačnej sústavy, alebo sa môžu poskytovať podporné služby. Práve toto je hlavným prínosom pološpičkovej prevádzky (Dušička, Šulek, 2009).

Pološpičková regulácia prietoku však môže spôsobiť zmeny v splaveninovom režime rieky. Vzhľadom na to, že transport sedimentov je priamo ovplyvnený rýchlosťou a hĺbkou vody, môžu náhle zmeny v týchto premenných viesť k významným zmenám. Zvýšená erózia a usadzovanie sedimentov sa nevyhnutne prejaví na morfológii koryta.

Pre posúdenie vplyvu regulačnej prevádzky na splaveninový režim je navrhnutý scenár reprezentujúci pološpičkovú regulačnú prevádzku VEGA podľa prítokovo-odberového diagramu (Obr. 1.1).



Obr. 1.1 Prítokovo-odberový diagram

2 Plavebná prevádzka

2.1 Interakcia prevádzky VEGA a plavebnej prevádzky na Dunaji

Skúmanie vplyvu prevádzky VEGA na zmenu morfológie dna koryta je dôležité z hľadiska posúdenia tohto vplyvu na podmienky plavebnej bezpečnosti a dopravnej kapacity medzinárodnej vodnej cesty Dunaj. Kvantifikáciou tohto vplyvu je možné posúdiť ako VEGA svojou prevádzkou ovplyvňuje časový vývoj parametrov plavebnej dráhy (PPD). Na základe tejto kvantifikácie je potom možné navrhnúť opatrenia na minimalizáciu prípadného zisteného nepriaznivého vplyvu regulačnej prevádzky VEGA na podmienky plavby, resp. vylúčiť ich potrebu v prípade, že sa negatívny vplyv nepreukáže.

2.2 Plavebná dráha

Plavebná dráha je časť koryta vodnej cesty, v ktorej sú zaistené parametre plavebnej dráhy (PPD) – najmä hĺbka a šírka plavebnej dráhy. Pre zjednotenie PPD vydala Dunajská komisia dokument „Odporúčania pre stanovenie parametrov plavebnej dráhy, hydrotechnických a iných stavieb na Dunaji“ (DK, Budapešť 2013), ktorým sa signatári riadia pri údržbe plavebnej dráhy na svojom úseku. Tieto odporúčania majú technický a hospodársky význam s ohľadom na bezpečnosť a dopravnú výkonnosť plavebnej prevádzky. Dokument definuje minimálne hĺbky, šírky, polomery oblúkov plavebnej dráhy, rozmery plavebných komôr, rejd, šírky a podjazdné výšky mostných konštrukcií a vedení vysokého napätia a iných líniových objektov križujúcich plavebnú dráhu. Z perspektívy tejto práce sú relevantné predovšetkým tvarové charakteristiky plavebnej dráhy – hĺbka, šírka, polomer oblúka, ktoré sú v uvedené v Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Parametre plavebnej dráhy na slovenskom a slovensko – maďarskom úseku podľa „Odporúčaní Dunajskej Komisie pre určenie parametrov plavebnej dráhy, hydrotechnických a iných objektov na Dunaji“ (DK, Budapešť 2013)

Úsek	Ponor v klúde [m]	Šírka [m]	Polomer oblúka [m]
Devín (rkm 1880) - Klížska Nemá (1790)	2.5	100* 120	800** 1000
Klížska Nemá (1790) - Ipeľ (rkm 1708)	2.5	100* 120	800** 1000

* nepriaznivé úseky v dôsledku geomorfologických podmienok

** v zákrutách

3 Ciele dizertačnej práce

Hlavnými cieľmi dizertačnej práce je :

- analyzovať a identifikovať vplyv regulačnej prevádzky VE na splaveninový režim toku pod VE v súvislosti s morfológickým vývojom koryta a jeho vplyvom na parametre plavebnej dráhy,
- kvantifikovať vplyv regulačnej prevádzky VEGA na splaveninový režim Dunaja v úseku medzi Sapom (rkm 1810) a Klížskou Nemou (rkm 1791), t. j. v úseku, v ktorom sa nachádzajú v súčasnosti kritické brody,
- vyhodnotiť vplyv regulačnej prevádzky VE porovnaním morfológických zmien v predmetnom úseku Dunaja a ich vplyvov na parametre plavebnej dráhy v tomto úseku, vyvolaných regulačnou resp. pološpičkovou prevádzkou VEGA a prietokovou prevádzkou VEGA.

Na splnenie hlavných cieľov práce je potrebné splniť nasledovné čiastkové ciele, ktorými sú

- kalibrácia hydrodynamického modelu predmetného úseku Dunaja,
- kalibrácia modelu transportu sedimentov v predmetnom úseku Dunaja.

Analytická časť práce zahŕňa prehľad teoretických informácií, metód výpočtu a numerického modelovania s dôrazom na 2D modelovanie. Analýza transportu sedimentov a analýza zmien

morfológie dna v plavebnej dráhe je zameraná na úsek rkm 1810 – 1791. Je to najbližší prirodzený úsek toku pod VEGA a zároveň je veľmi bohatý na terénne výskumy a merania. Výpočet je založený na kalibrovanom 2D matematickom modeli. Kalibrácia prebehla v dvoch fázach. V prvej fáze bol model kalibrovaný ako čisto hydrodynamický pomocou hydraulického drsnosti na hladine v dvoch vodočerných staniách (Medved'ov a Klížska Nemá). V druhej fáze bol hydrodynamický model rozšírený o modul transportu sedimentov a kalibrovaný na merané hodnoty transportu splavenín v profile rkm 1795.58 v rokoch 2000 a 2002 (Lukáč, 2002). V rámci kalibrácie boli zohľadnené a otestované na vhodnosť všetky dostupné transportné rovnice (Engelund-Hansen (1967), Van Rijn (1984), Meyer-Peter Müller (1948), Engelund-Fredsoe (1976)). Najvýkonnejší model bol následne použitý na výpočet transportu splavenín a morfológického vývoja. Súčasťou simulácií bola analýza neistôt s 95% predikčným intervalom pomocou metódy FOSM. Vplyv regulačnej prevádzky bol vyhodnotený porovnaním morfológických zmien v predmednom úseku Dunaja vyvolaných regulačnou / pološpičkovou prevádzkou VEGA a prietokovou prevádzkou VEGA.

4 Metodika postupu a metódy skúmania

4.1 Transport sedimentov

V kontexte riečnej hydrauliky je pochopenie zákonitostí transportu sedimentov kľúčovým predpokladom pre koncepčný návrh objektov, ktoré sú v bezprostrednej blízkosti koryta, či do neho zasahujú - ako napr. mosty, priepusty, hrádze, derivačné kanály, priehrady, prechody potrubí, brehové opevnenia - a pre hodnotenie dopadu vodohospodárskych aktivít ako ťažba sedimentov, čerpanie vody, prehlbovanie alebo reprofilačné práce v rámci plavebnej dráhy. Transport splavenín má významný vplyv na plavbu. Nadmerná sedimentácia zvyšuje náklady na údržbu plavebnej dráhy, môže obmedziť prieplyvnosť a zvýšiť riziko uviaznutia lodí. Nadmerná erózia môže viesť k degradácii koryta rieky, destabilizovať základy hydrotechnických objektov (napr. mostov, potrubí, ochranných hrádzí), vytvárať hlboké výmoly až pretrhnutie riečneho dna a tým negatívne ovplyvniť hladinový režim podzemných vôd. Erované splaveniny môžu spôsobiť nadmerné zanesenie v nižších polohách toku. Manažment transportu sedimentov je kľúčový pre udržanie bezpečnosti a efektivity vodnej dopravy (BAW, 2016), (Julien, 2018).

4.2 Procesy transportu sedimentov

Pri modelovaní transportu sedimentov sa stretávame s komplexným problémom. Aluviálne korytá prirodzených tokov predstavujú dve dynamické hranice: voľnú hladinu a riečne dno. Táto dynamika medzi voľnou hladinou a zmenami morfológie riečneho dna predstavuje extrémne komplexný systém. Morfológické procesy, ktoré formujú riečne dno, sú výsledkom zložitého trojrozmerného turbulentného prúdenia, ktoré sa neustále mení v priestore a čase. Dno aluviálnych tokov je tvorené pohybom suspendovaného materiálu (plavenín) a pevného materiálu (splavenín). Splaveniny sú dnové častice (štrk, piesok), ktoré sa pohybujú kĺzaním, kotúľaním, alebo skákaním na, alebo blízko pri dne. Plaveniny sú naopak v dôsledku turbulencie premiešané s vodou a pohybujú sa spolu s prúdom. Neexistuje žiadna jednoznačná hranica medzi splaveninami pohybujúcimi sa po dne a plaveninami rozpustenými vo vode. Daná častica, ktorá je náchylná k suspenzii v danom prúde, môže byť dočasne transportovaná vo forme splaveniny alebo ako suspendovaný sediment, alebo môže byť dočasne v pokoji na dne rieky. Splaveninový režim je spojený s odstraňovaním (eróziou) alebo ukladaním (sedimentáciou) sedimentu na dne. To je hlavný transportný mechanizmus zodpovedný za morfológické zmeny v aluviálnych korytách (Julien, 2018), (Habersack, 2011).

4.3 Metódy výpočtu a analýza transportu sedimentov

Fyzikálne modelovanie je vynikajúcim nástrojom na štúdium vzájomného pôsobenia riečného prúdenia a lokálnych štruktúr. Fyzikálne modely sú malé reprodukcie skutočnej rieky. Umožňujú detailne pozorovať a merať komplexné javy, ktoré by nebolo možné skúmať v teréne. Tvorba fyzikálnych modelov je však finančne a časovo náročná a ich používanie vo veľkom meradle alebo na riešenie dlhodobých problémov riečnej morfológie je preto často nepraktické. Numerické

modely majú výhodu vyššej rýchlosti riešenia problému a nižších nákladov v porovnaní s fyzikálnymi modelmi. Numerické hydrodynamické modely sú pre výpočet prietokov pomerne pokročilé a presné už dnes a numerické morfologické modelovanie by bez nich nebolo možné. Numerické modely sú ale len tak dobré, ako rovnice ktoré riešia. Rovnice na výpočet transportu sedimentov používané v morfologických modeloch sú stále hlavným zdrojom neistoty a hlavnou nevýhodou numerického modelovania v porovnaní s fyzikálnymi modelmi (Habersack, 2011), (Julien, 2018).

Neistota numerických modelov môže byť minimalizovaná, ak sú k dispozícii namerané dáta pre kalibráciu a verifikáciu. Kalibrácia je nastavenie kalibračných parametrov v rovniciach tak, aby boli dosiahnuté namerané hodnoty. Následná verifikácia modelu spočíva v porovnaní výsledku kalibrovaného modelu s dátami určenými pre verifikáciu. Optimálne je teda disponovať dvoma súbormi dát. V takých prípadoch sú dosahované dobré kvalitatívne výsledky. Dokonca aj keď nie sú k dispozícii spoľahlivé údaje pre kalibráciu, môžu numerické modely poskytnúť užitočné kvalitatívne údaje. Napríklad, môžu byť použité na hodnotenie morfologických účinkov rôznych variantov, kde je rozhodujúca amplitúda zmeny alebo trend vývoja zmeny. Pre mnoho praktických problémov sú takéto výsledky postačujúce. Je zrejmé, že numerické modelovanie riečnej morfológie je dôležitým aspektom hydrotechnického inžinierstva. Môže byť použité na predikciu vplyvu inžinierskych objektov na prírodné aj umelé vodné toky, protipovodňovú ochranu, hladinový režim podzemných vôd, na simuláciu riečnej morfológie, splaveninového režimu, vývoja habitatu vodných živočíchov a na ďalšie s nimi súvisiace aspekty (Tritthart, 2007), (Habersack, 2011) a (Julien, 2018).

4.3.1 Model DHI Mike21

Pre účely tejto práce poskytla spoločnosť DHI Slovakia detailnú výpočtovú sieť hydrodynamického modelu Mike 21 FM záujmového úseku Sap - Komárno. Bol zhotovený a použitý v rámci projektu RIS (Riečne Informačné Služby) s dôrazom na efektívny výpočet a vysokú presnosť odhadu plavebných hĺbok (plavba.nsat.sk, 31.05.2023). Kóty výhonov zodpovedajú zameraniu po povodni v roku 2013. Model má celkovú dĺžku 41 km a pozostáva z ~ 150 000 elementov. Výpočtová sieť modelu je tvorená kombináciou štrukturovanej kurvilineárnej a neštrukturovanej trojuholníkovej siete. Topografia koryta, prítokov a ramien je diskretizovaná kurvilineárnou a členitý terén v inundácii trojuholníkovou výpočtovou sieťou. Pri tvorbe siete boli dodržané kvalitatívne kritériá ortogonalít, expanzného pomeru a pomeru strán. Vývoj morfológie je v tejto práci riešený pomocou 2D modelu Mike 21 ST (Sand Transport), ktorý počíta transport nekohéznych materiálov. Základom pre modelovanie transportu sedimentov je hydrodynamický model záujmového úseku vytvorený pomocou Mike 21 FM (Flow Model). Mike21 je dvojrozmerný hydrodynamický model, založený na riešení dvojrozmerných RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) rovníc, integrovaných po hĺbke. Riešenie je založené na diskretizácii pomocou metódy konečných objemov, kde priestorová doména je diskretizovaná rozdelením na neprekrývajúce sa troj- alebo štvoruholníkové elementy. Závislé premenné systému sú reprezentované ako konštantná hodnota vzťahujúca sa k stredu elementu (DHI, 2017).

4.3.2 Modul transportu sedimentov - Mike21 ST (sand transport)

Výpočet transportu sedimentov pomocou Mike21ST je založený na hydrodynamických podmienkach a vlastnostiach sedimentu. Modelovanie transportu sedimentov je rozdelené na transport dnového materiálu a transport suspendovaného sedimentu. Primárnym faktorom vplyvu na plavebné podmienky na riešenom úseku Dunaja je transport sedimentu posúvanom pod dne (splaveniny).

Pri absencii externých zdrojov sedimentu, sa predpokladá, že všetok sediment v systéme pochádza z dna modelu a uvažuje sa s tzv. rovnovážnym popisom transportu sedimentov.

Na výpočet zmeny výšky dna je použitá dvojrozmerná rovnica zachovania objemu splavenín (Exner, 1920), (Exner, 1925), (Kikkawa, 1976), ktorá je funkciou pórovitosti dnového materiálu a transportu splavenín, ktorý je stanovený na základe vhodnej transportnej rovnice.

Pre stanovenie transportu sedimentov sú dôležité dva efekty ktoré musia byť zohľadnené:

- Efekt sekundárneho prúdenia spôsobený centrifugálnymi silami v zákrute rieky
- Efekt priečneho sklonu dna

Efekt sekundárneho prúdenia spôsobuje odchýlku smeru šmykového napätia pri dne od hlavného smeru prúdenia smerom do konvexy toku. Naopak efekt priečneho sklonu dna pôsobí opačným smerom. Výslednica týchto dvoch síl určuje smer transportu sedimentu. Priečny sklon dna ovplyvňuje transport splavenín a jeho smer, pričom práve smer je najdôležitejší pre morfológické modelovanie. Sekundárne prúdenie musí byť modelované ešte pred výpočtom transportu splavenín.

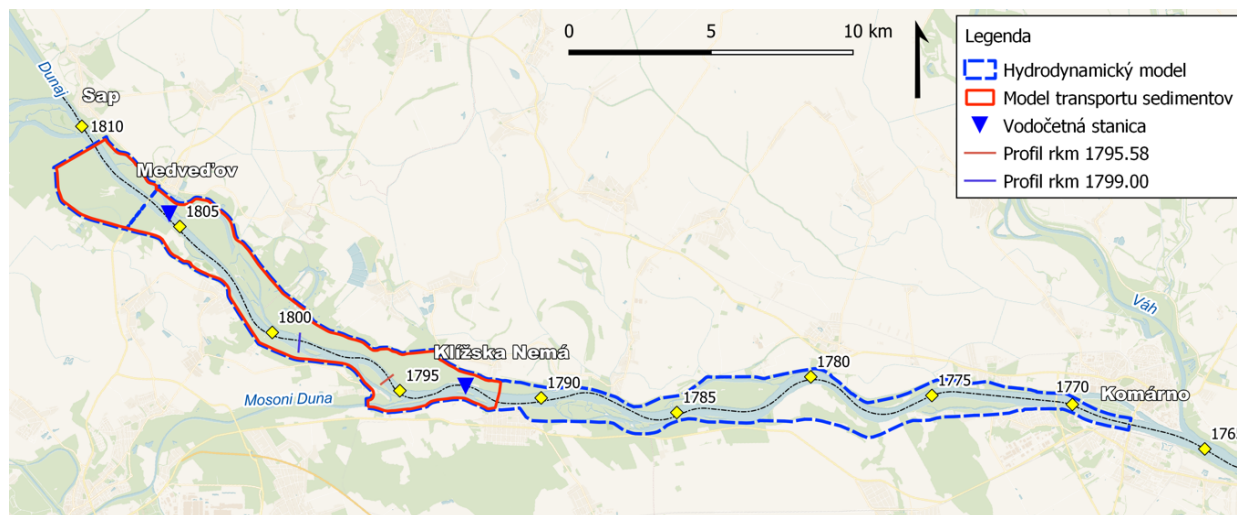
Predikcia distribúcie hĺbok v priečnom profile riečneho oblúku na aluviálnych tokoch je esenciálna pri posudzovaní splavnosti a navrhovaní brehových opevnení. Modelov na výpočet priečneho sklonu bolo navrhnutých veľa, podrobne sú popísané v (Olesen, 1989). Mike21 používa model na výpočet transportu sedimentov v smere priečneho sklonu dna podľa Kikkawa et al. (Kikkawa, 1976).

Na výpočet transportu splavenín sú v Mike21ST k dispozícii štyri rovnice: Meyer-Peter Müller (1948), Van Rijn (1984), Engelund-Hansen (1967) a Engelund-Fredsoe (1976). Každá z nich je vhodná na použitie len pre určitý rozsah podmienok a zrnitosti pre ktoré boli odvodené (DHI, 2017). Uvedené transportné formulácie nezohľadňujú vplyv pórovitosti dnového materiálu, ten je súčasťou rovnice zachovania objemu splavenín. Na predikciu začiatku transportu sedimentu využíva každá transportná rovnica Shieldsov parameter. Shieldsov parameter bezrozmerné číslo ktoré definuje pomer medzi šmykovým napätím a gravitačnou silou pôsobiacou na časticu (Shields, 1936). Transport splavenín preto závislý predovšetkým od šmykového napätia pri dne, ktoré je funkciou rýchlosti a geometrie koryta a vo výpočte sa mení okamžite so zmenami prúdenia.

- Meyer-Peter Müller (1948): Rovnica bola založená predovšetkým na údajoch z napriamovaných experimentálnych koryt a bola úspešne overená pri použití na prirodzených tokoch s hrubozrnným dnovým materiálom so zanedbateľným podielom plavenín. Preto by nemala byť aplikovaná na toky s významnou mierou rozpusteného sedimentu (Meyer-Peter, 1948).
- Van Rijn (1984): Rovnica počíta transport sedimentov ako funkciu výšky saltácie, rýchlosti a pohybu častíc. Van Rijn navrhol komplexný model, ktorý zohľadňuje rôzne parametre prietoku a sedimentu. Je obzvlášť vhodný na použitie pri zložitých riečnych podmienkach a variabilných prietokoch (Van Rijn, 1984).
- Engelund-Hansen (1967): Engelund-Hansenova rovnica transportu splavenín bola odvodená z pozorovaní na experimentálnych korytách pre štyri zrnitosti d_{50} (0.19, 0.27, 0.45 a 0.93 mm). Model definuje celkový transport sedimentov (suspendovaný aj dnový materiál). Korytový substrát by mal mať minimálny priemer zrna 0.15 mm a nemal by mať širokú variabilitu frakcií okolo mediánu d_{50} (Engelund, 1967). Na odvodenie transportu splavenín vyžaduje dáta o pomere splavenín k plaveninám. Pomer je v modeli definovaný kalibračnými faktormi k_b a k_s (Engelund, 1967).
- Engelund a Fredsøe (1976): Engelund a Fredsøeva rovnica predstavuje jednoduchý matematický model transportu sedimentov v priamych aluviálnych korytách. Model bol odvodený pre jemné až hrubozrnné piesky (0.06 mm - 2 mm). Pri použití na riekach so štrkovým dnom môže byť nespoľahlivý (Engelund, 1976).

4.4 Numerický model

Hydrodynamický model pokrýva úsek toku od rkm 1810 (Sap) až rkm 1768 (Komárno) (Obr. 4.1). Je väčší ako model transportu sedimentov a slúži predovšetkým na výpočet dolnej okrajovej podmienky (mernej krivky koryta v profile rkm 1791) pre model transportu sedimentov. Geometria koryta a inundácie je založená na terénnych meraniach a laserovom zalietaní z roku 2013. Na celom úseku sa nachádzajú dva mosty ktoré boli zohľadnené vo výpočte: Medveďovský cestný most s dvoma piliermi a železničný most v Komárne so štyrmi piliermi. Model transportu sedimentov pokrýva úsek od rkm 1810 (Sap) - rkm 1791 (Klížska Nemá). Dĺžka 18 km, plocha 30.91km². Štvorcová sieť v koryte rieky, trojuholníková sieť v inundácii. Počet elementov 82046.



Obr. 4.1 Situácia

4.4.1 Kalibrácia hydrodynamického modelu

Pre kalibráciu hydrodynamického modelu boli použité merané hladiny pri rozdielnych prietokoch na dvoch vodočtoch v skúmanom úseku Dunaja (Medveďov a Klížska Nemá). V hydrologických údajoch od Slovenského meteorologického ústavu (SHMU) boli identifikované úseky s ustáleným prúdením pre tri prietokové scenáre (Tab. 4.1). Merané hladiny poskytujú základ pre kalibráciu numerického modelu a umožňujú presné nastavenie kalibračného parametra - koeficientu drsnosti, pre dosiahnutie čo najlepšej zhody medzi simulovanými a meranými hodnotami hladín (Tab. 4.2).

Tab. 4.1 Okrajové podmienky modelu

Q Sap [m ³ /s]	Q Mošonský Dunaj [m ³ /s]	H Komárno [m n.m.]
1195.59	40	104.88
3034.07	40	107.15
5120.37	40	108.92

Tab. 4.2 Kalibračné údaje vo vodočetných staniách

H Medveďov [m n.m.]	H Klížska Nemá [m n.m.]
108.85	106.18
111.65	108.63
113.82	110.74

Pri kalibrácii hydrodynamického modelu je dôležitá aj správna definícia priestorovej distribúcie drsnosti v modelovanom úseku. Keďže presná distribúcia drsnosti v skúmanom úseku nie je známa, museli sme ju odhadnúť na základe predpokladov o prostredí. V riečnom koryte je typická distribúcia drsnosti závislá od niekoľkých faktorov, ako sú rýchlosti prúdenia, usporiadanie a veľkosť substrátu (napr. piesok, štrk, kameň) a vegetácia. V bežnej hydrotechnickej praxi je model kalibrovaný napríklad na hladinách pri nízkom stave a následne je validovaný na hladinách pri

vysokom stave. V rámci kalibrácie je cieľom dosiahnuť minimálnu odchýlku od meraných hodnôt. Validácia slúži na overenie kalibrácie. Ak sú odchýlky hladín pri validačnom výpočte dostatočne nízke, sú zdokumentované a model je považovaný za validovaný (Chad, 2001).

Vo výsledku tak dochádza k nad- alebo podhodnoteniu pri validačných prietokoch. Takýto postup je v mnohých aplikáciách riečnej hydrauliky dostatočný. Na výpočet transportu sedimentov pri vysoko nestacionárnom prúdení je však potrebné dosiahnuť čo najvyššiu presnosť v celom rozsahu prietokov. Bol preto zvolený postup, ktorý minimalizuje celkovú odchýlku od všetkých meraných dát v celom rozsahu prietokov na základe hodnotiacich kritérií: stredná kvadratická chyba (RMSE), priemerná chyba (MAE) a koeficient determinácie (R^2) (Gómez-Zambrano, 2017).

Proces kalibrácie spočíval v iteratívnej zmene koeficientu drsnosti, výpočte hladín a porovnaní s meraniami, až kým bola dosiahnutá dostatočne dobrá zhoda s meranými hladinami. V úseku (rkm 1810 – 1800) kalibrovaného modelu je drsnosť v hlbšej časti koryta výrazne nižšia ako v brehovej zóne, od $M=25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ do $M=42 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Od rkm 1800 je priečna distribúcia drsnosti rovnomerná od $M=35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ do $M=58 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Výnimkou je úsek na úrovni Klížskej Nemej, kde bolo potrebné znížiť drsnosť pod úroveň bežných hodnôt až do $M=75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Takéto nízke drsnosti sú nefyzikálne, avšak mapa drsností nemusí nevyhnutne exaktne reprezentovať skutočnú drsnosť koryta. V kontexte kalibrácie sú prípustné aj hodnoty mimo štandardný rozhas, pretože nereprezentujú len hydraulickú drsnosť dna, ale kompenzujú vplyv neznámych riečnych útvarov v koryte, vegetácie a pod. Priemerná rýchlosť prúdenia v koryte v tomto úseku je napriek nízkej drsnosti $\sim 1.8 \text{ m/s}$ ($Q=3034.07 \text{ m}^3/\text{s}$) čo je v súlade s meraniami (Camenen, 2011). Rozdiel hladín kalibrovaného modelu od meraní bol na vodočte Medved'ov v rozsahu od -0.127 m do 0.034 m , na vodočte Klížska Nemá od -0.1 m do 0.052 m (Tab. 4.3).

Tab. 4.3 Hodnotenie kalibrácie

Q Sap [m ³ /s]	H Medvedov [m n.m.]	Odchýlka od meraní [m]	H Klížska Nemá [m n.m.]	Odchýlka od meraní [m]	RMSE	MAE	R ²
1195.59	108.799	-0.051	106.232	0.052			
3034.07	111.684	0.034	108.643	0.013	0.074	0.064	0.998
5120.37	113.693	-0.127	110.64	-0.100			

4.4.2 Kalibrácia modelu transportu sedimentov

Distribúcia zrnitosti dnového materiálu je základným vstupným údajom pre morfologický model. Riešený úsek toku je bohatý na merania a analýzy v rámci viacerých štúdií z ktorých sú použité dáta na kalibráciu (Holubová, 2015), (Török, 2017), (Lukáč, 2016)(Holubová, 2004) a (Camenen, 2011). Merania transportu sedimentov boli vykonané v období od roku 2000 do roku 2002 v priečnom profile rkm 1795.58 počas 71 merných kampaní. Prietoky počas meraní boli v rozmedzí od $972 \text{ m}^3/\text{s}$ do $4745 \text{ m}^3/\text{s}$. V rámci každej mernej kampane bol vykonaný odber, váženie a preosiatie splavenín v šiestich lokalitách priečného profilu. Na minimalizáciu chyby bolo meranie opakované 10 krát a následne spriemerované. Taktiež boli odobrané vzorky dnového materiálu, ktorého stredná zrnitosť bola identická so splaveninami. Z meraní bola odvodená stredná zrnitosť splavenín $d_{50} = 9 \text{ mm}$. Je dôležité poznamenať, že oko sieťky lapáku použitého na odber vzoriek bolo 3 mm . Z toho dôvodu bolo meranie transportu čiastočne podhodnotené a veľkosť zrna nadhodnotená. Z meraní v profile 1795.58 bol odvodený vzťah (1) transportu sedimentov od prietoku v kg/s (Camenen, 2011).

$$Q_s = 3.224 \cdot 10^{-6} \cdot Q^{1.976} \quad (1)$$

V rámci projektu DuReFlood bol v roku 2014 realizovaný ďalší rozsiahly program odberov dnového materiálu. Vzorky boli odoberané celkovo na 56 lokalitách v koryte a vyhodnotené sitovou metódou v hydraulickom laboratóriu VÚVH. Vzorky dnového materiálu boli odoberané z člna pomocou valcového lapáku. Doplnkový odber vzoriek zahŕňal hlavné prítoky – Váh, Hron a

Ipeľ. Bolo tiež možné porovnať údaje so staršími, získanými počas terénnych kampaní v rokoch 2002 a 2004 (Holubová, 2004). Porovnanie ukázalo, že zloženie dnového materiálu zostalo v období 2002-2014 takmer nezmenené (Holubová, 2015). Z meraní vyplýva, že na úseku rkm 1810 až 1791 je dnový materiál strednej zrnitosti 7.8 mm až 14.4 mm (Lukáč, 2017) - *Tab. 4.4*.

Tab. 4.4 Vzorky z 2014

rkm	Vzorky z 2014	
	d ₅₀ [mm]	σ [mm]
1810 - 1791	7.3 - 14.4	1.69 - 3.83

Model transportu sedimentov je multiparametrický systém, ktorý je náchylný na problémy ekvifinálnosti – dosiahnutie rovnakého výsledku rôznymi cestami. Môže tak vzniknúť zdanlivo kalibrovaný model, ktorý však produkuje zavádzajúce, nerealistické predikcie (van Maren, 2016). Bolo preto dôležité zvoliť správnu kalibračnú stratégiu s rozumným hodnotiacim kritériom. Model bol kalibrovaný pomocou kalibračného faktora transportu splavenín k_b na transport splavenín v profile rkm 1795.58. Prijateľný rozsah k_b je 0.5 až 2.0, hodnoty mimo tohto rozsahu spochybňujú validitu zvolenej transportnej funkcie. Pórovitosť je relevantným kalibračným parametrom modelu transportu sedimentov, v simulovaní transportu splavenín sa však odráža len nepriamo, pretože vstupuje do výpočtu až pri stanovení zmeny výšky dna (DHI, 2017). Taký prístup má zmysel skôr pri problémoch, kde je prevažujúcim javom zmena objemov a kde sú kalibračnými dátami merané objemy, napríklad zanášanie vodnej zdrže. Pórovitosť je v modeli definovaná a priori hodnotou 0.40 ako najlepší odhad pre dobre triedený jemný až stredný štrk (Allen, 1985), (Frings, 2011). Stredná zrnitosť bola v modeli definovaná podľa zrnitosti nameranej v kalibračnom profile 1795.58, $d_{50}=9\text{mm}$ - *Tab. 4.5*.

Tab. 4.5 Okrajové podmienky

Q Sap	Q Mošonský Dunaj	Qs rkm 1795.58	d ₅₀	σ	Φ	k _b
[m ³ /s]	[m ³ /s]	[kg/s]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[-]
1250	40	4.25	9	2.204	0.4	0.5 – 2.0
2750	40	20.16	9	2.204	0.4	0.5 – 2.0

Kalibračné prietoky sú definované tak, aby sa prekrývali s prietokmi pri ktorých bolo odobraných čo najviac vzoriek v priečnom profile ($\sim 1000 \text{ m}^3/\text{s} < Q < \sim 3000 \text{ m}^3/\text{s}$) (Camenen, 2011). Distribúcia simulovaného transportu sedimentov bola pre účely kontroly hodnovernosti porovnaná s meraniami. Horná prietoková okrajová podmienka modelu a kalibračné hodnoty Q_s sú zhrnuté v *Tab. 4.5*. Dolná okrajová podmienka je konzumčná krivka odvodená z hydrodynamického modelu v profile rkm 1791, na úrovni Klížskej Nemej.

Súbor kalibračných výpočtov bol zložený z 20 modelov. Päť modelov s rôznym k_b (0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0) pre každú transportnú rovnicu (Engelund and Hansen (1967), Van Rijn (1984), Engelund and Fredsøe (1976), Meyer-Peter-Müller (1948)) pri prietoku $1250 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2750 \text{ m}^3/\text{s}$. Modely sú hodnotené na základe hodnotiacich kritérií RMSE, MAE a R^2 rovnakým spôsobom ako v kapitole 4.4.1 Kalibrácia hydrodynamického modelu.

Model Engelund a Hansen (1967) produkuje výrazne nadhodnotené hodnoty Q_s pre oba prietoky. Pri $Q = 2750 \text{ m}^3/\text{s}$ sa prenos sedimentov pohybuje od $71,08 \text{ kg/s}$ (pri $k_b = 0,5$) do $292,45 \text{ kg/s}$ (pri $k_b = 2$) (*Tab. 4.6*). Pri $Q = 1250 \text{ m}^3/\text{s}$ sa prenos sedimentov mení od $17,97 \text{ kg/s}$ (pri $k_b = 0,5$) do $72,08 \text{ kg/s}$ (pri $k_b = 2$). Chyby predikcie tohto modelu však, ako ukazuje RMSE a MAE, sú dosť vysoké a jeho R^2 hodnoty sú záporné, čo naznačuje slabé prispôbenie dátam.

Model Engelund a Fredsoe (1976) produkuje výrazne vyššie hodnoty Q_s ako model Engelund a Hansen. Pri $Q = 2750 \text{ m}^3/\text{s}$ sa Q_s mení od 191,95 kg/s (pri $k_b = 0,5$) do obrovskej hodnoty 962,12 kg/s (pri $k_b = 2$) (Tab. 4.6). Rovnaký trend je pozorovaný aj pri $Q = 1250 \text{ m}^3/\text{s}$. Chyby predikcie sú ešte väčšie než tie v modeli Engelund a Hansen a hodnoty R^2 sú hlboko záporné, čo naznačuje, že tento model sa veľmi zle prispôsobuje dátam v študovaných podmienkach.

Tab. 4.6 Modelovaný transport sedimentov v profile rkm 1795.58 - *nevyhovujúce modely*

Transportná rovnica	k_b	Q = 2750 m ³ /s	Q = 1250 m ³ /s	RMSE	MAE	R ²
		Q_s [kg/s]	Q_s [kg/s]			
Engelund and Hansen	0.5	71.08	17.97	37.29	32.32	-20.95
	0.75	107.58	27	63.87	55.09	-63.42
	1	218.11	54.07	144.33	123.88	-327.95
	1.5	144.17	36.05	90.53	77.91	-128.4
	2	292.45	72.08	198.42	170.06	-620.66
Engelund and Fredsoe	0.5	191.95	33.03	123.17	100.29	-238.54
	0.75	297.02	49.67	198.38	161.14	-620.45
	1	675.49	99.28	468.23	375.18	-3460.86
	1.5	405.51	66.35	276	223.73	-1201.81
	2	962.12	131.5	672.12	534.61	-7132.07
Van Rijn	0.75	39.25	5.16	13.52	10	-1.88
	1	80.91	10.37	43.17	33.44	-28.43
	1.5	52.99	6.89	23.29	17.74	-7.56
	2	109.72	13.84	63.69	49.58	-63.05
Meyer-Peter Müller	1	40.21	15.8	16.36	15.8	-3.23
	1.5	26.44	10.54	6.28	6.28	0.38
	2	54.47	21.05	27.01	25.55	-10.52

Model Van Rijn (1984) produkuje hodnoty Q_s pohybujúce sa od 25,87 kg/s do 109,72 kg/s pre $Q = 2750 \text{ m}^3/\text{s}$ a od 3,43 kg/s do 13,84 kg/s pre $Q = 1250 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 4.7). Aj chyby predikcie (RMSE a MAE) sú relatívne nízke. Model vykazuje kladné hodnoty $R^2=0.74$ pri $k_b = 0,5$, čo naznačuje relatívne dobré prispôsobenie dátam.

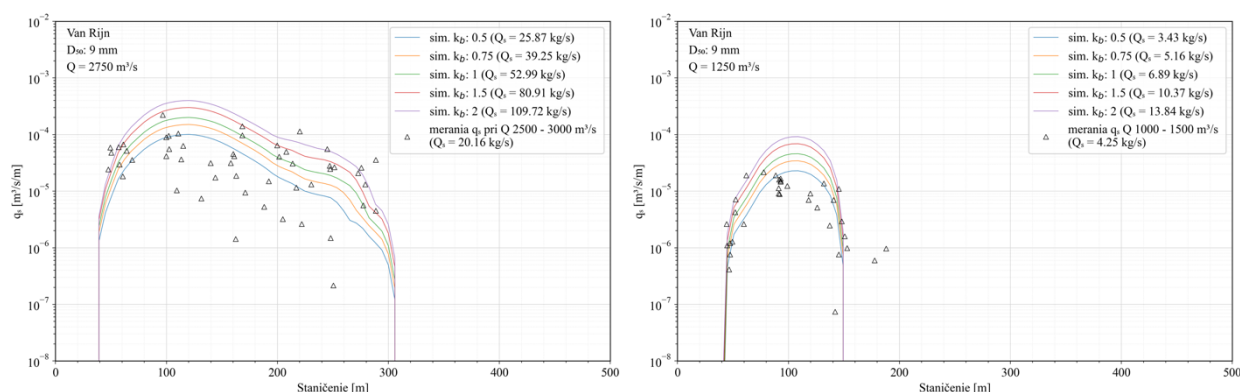
Model Meyer-Peter Müller (1948) vykazuje najmenší rozsah prenosu sedimentov pre oba stavy prietoku. Vykazuje tiež pomerne malé chyby predikcie a kladné hodnoty $R^2=0.6$ pri $k_b = 0,5$ a $R^2=0.89$ pri $k_b = 0,75$ (Tab. 4.7), čo naznačuje relatívne dobré prispôsobenie meraným údajom. Výsledky kalibrácie poukazujú na vysokú variabilitu medzi rôznymi modelmi transportu sedimentov, podčiarkujú zložitosť procesov transportu sedimentov.

Tab. 4.7 Modelovaný transport sedimentov v profile rkm 1795.58 - *vyhovujúce modely*

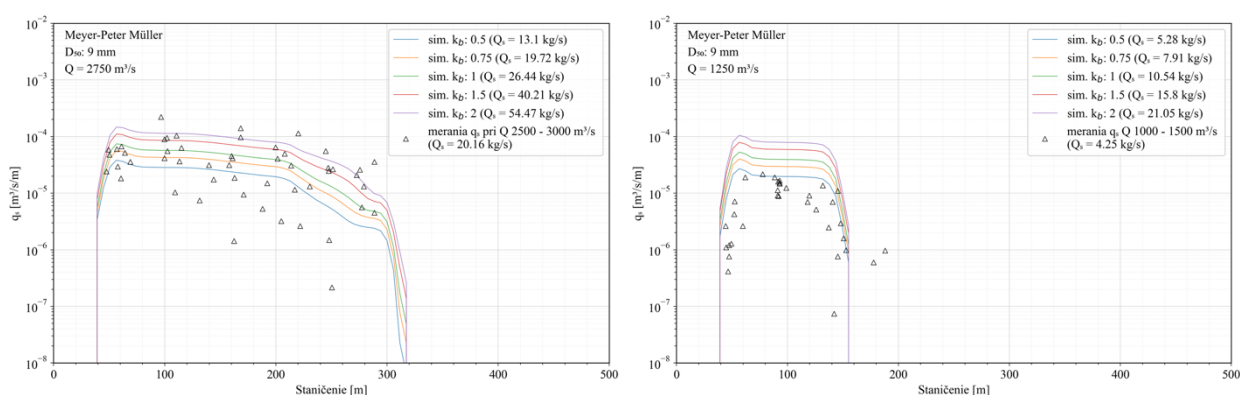
Transportná rovnica	k_b	Q = 2750 m ³ /s	Q = 1250 m ³ /s	RMSE	MAE	R ²
		Q_s [kg/s]	Q_s [kg/s]			
Van Rijn	0.5	25.87	3.43	4.08	3.26	0.74
Meyer-Peter	0.5	13.1	5.28	5.05	4.05	0.6
Müller	0.75	19.72	7.91	2.61	2.05	0.89

Hodnovernosť výpočtu vyhovujúcich modelov bola podporená porovnaním s meraným transportom sedimentov v profile rkm 1795.58 (Obr. 4.2 a Obr. 4.3). Pri žiadnom modeli sa

nevyskytli artefakty alebo nefyzikálne špičky, výpočty boli stabilné v celom rozsahu vstupných parametrov.



Obr. 4.2 Distribúcia transportu sedimentov v priečnom profile rkm 1795.58, transportná rovnica Van Rijn, pre $Q=2750 \text{ m}^3/\text{s}$ a $Q=1250 \text{ m}^3/\text{s}$



Obr. 4.3 Distribúcia transportu sedimentov v priečnom profile rkm 1795.58 pre $Q=2750 \text{ m}^3/\text{s}$, transportná rovnica Meyer-Peter Müller, pre $Q=2750 \text{ m}^3/\text{s}$ a $Q=1250 \text{ m}^3/\text{s}$

4.5 Výber vhodnej formulácie

Výsledkom kalibrácie sú dva modely Van Rijn (1984) s $k_b=0.5$ a Meyer-Peter-Müller (1948) s $k_b=0.75$. Oba vzorce sú bežne používané a overené na tokoch s podobnými podmienkami ako sú na riešenom úseku Dunaja. Cieľom nasledujúcej úvahy bude výber optimálnej formulácie pre riešený problém. Vzorec Meyer-Peter Müller sa často používa kvôli svojej jednoduchosti. Je to empirický vzorec založený na rozsiahlych experimentoch fyzikálnych modeloch a bežne sa používa na modelovanie transportu sedimentov v riekach so štrkovým dnom. Vzorec MPM je obzvlášť robustný pre relatívne hrubé zrnitosti, čo je v súlade s riešeným prípadom s $d_{50}=9 \text{ mm}$. Jedným obmedzením vzorca MPM je však to, že bol pôvodne vyvinutý pre stabilné, rovnomerné prietokové podmienky. Výpočet pri vysoko nestabilných podmienkach prúdenia, k akým dochádza pri regulačnej prevádzke vodnej elektrárne, nemusí byť spoľahlivý (Meyer-Peter, 1948). Van Rijnov vzorec je na druhej strane komplexnejším modelom transportu sedimentov, ktorý zohľadňuje rôzne parametre prietoku a sedimentu. V rámci validácie preukázal dobrý výkon pre širokú škálu veľkostí sedimentov a podmienok neustáleného prúdenia (Van Rijn, 1984). Je obzvlášť výhodný v zložitých a variabilných prostrediach (zakrivenie prirodzeného toku, prudká zmena prietoku). Je však zložitejší a výpočtovo náročnejší ako vzorec Meyer-Peter Müller. Vzhľadom na náhle zmeny prietoku spôsobené špičkováním regulačnej elektrárne bol pri riešení problému zvolený komplexnejší model Van Rijn.

4.6 Neistota modelu

Komplexné modely, akým je model transportu sedimentov, vyžadujú kvantifikáciu neistoty. Je nevyhnutná na to, aby sme zistili, do akého rozsahu sú výsledky modelu spätne podložené reálnymi dátami a zároveň s akou presnosťou model reprezentuje skutočný jav. Presné určenie

neistoty výsledkov modelu je možné uskutočniť len vtedy, ak je známy stupeň neistoty všetkých vstupných parametrov a definovaný je aj tolerovaný rozptyl výsledkov. Príčiny neistoty výsledkov modelu možno rozdeliť do troch skupín: variabilita fyzikálnych parametrov, ktoré sú zahrnuté do modelu; nepresnosť a sporadická získaných dát; chyby modelovania (Mahadevan, 2009), (Walters, 2002).

4.6.1 First-order second-moment (FOSM)

Neistota modelu je v tejto práci riešená metódou FOSM. Je jednou z najpoužívanejších inžinierskych metód na stanovenie neistoty modelu. Na výpočet predikčného intervalu používa priemer a rozptyl vstupného parametru, podľa ktorých je výstupný parameter extrapolovaný. Pracuje s predpokladom, že vstupný parameter je popísaný Gaussovou distribúciou, ktorej rozptyl reprezentuje parameter neistoty. FOSM je výpočtovo veľmi efektívna metóda a vyžaduje len jednu simuláciu na vstupný parameter. Ak rozptyl výstupných parametrov nie je dostatočne malý, neistota modelu je nad- alebo podhodnotená. Nevýhodou metódy FOSM je predpoklad, že vstupné parametre nasledujú normálne rozdelenie a posudzovaný jav je považovaný za lineárny. Transport sedimentov je všeobecne nelineárny jav a metóda FOSM dokáže poskytnúť úplne spoľahlivé výsledky len ak je pozorovaný jav kvázi-lineárny a rozptyl vstupných parametrov je dostatočne malý. V porovnaní s inými metódami je však v praxi stále preferovaná, a to ani nie tak kvôli jej jednoduchosti a rýchlosti výpočtu, ako rádovo dlhším výpočtovým časom ostatných metód (Dalledonne, 2017), (Melching, 1992), (Mahadevan, 2009) a (Saltelli, 2008). Porovnaním s metódou Monte Carlo (MC) bolo zistené, že aj napriek jednoduchosti je zhoda s MC v relatívne priamych úsekoch toku veľmi dobrá (Dalledonne, 2017). Kritickým parametrom pre stanovenie neistoty modelu je stredná zrnitosť splavenín $d_{50}=9\text{mm}$. Pomocou pokročilej metódy analýzy neistôt s algoritmickou diferenciáciou a simuláciou Monte Carlo sa zistilo, že stredná veľkosť zrna d_{50} prispieva k až 25% variabilite výsledkov hydromorfologického modelu. Vstupné parametre (empirický Meyer-Peter-Müllerov faktor, drsnosť koryta) zohrávajú pri modelovaní transportu sedimentov až sekundárnu úlohu (Villaret, 2016). Neistoty v nameranej veľkosti zrna sú dôsledkom prirodzenej variability a chýb merania a sú reprezentované štandardnou odchýlkou 2,204 mm (*Kap. 4.4.2. Kalibrácia modelu transportu sedimentov*). Analýzou neistôt bol kvantifikovaný vplyv týchto neistôt na výstup modelu vo forme 95% predikčného intervalu. Výsledkom je lepšia predstava o robustnosti modelových predikcií, čím sa zvyšuje celková spoľahlivosť a interpretovateľnosť výsledkov výpočtu.

5 Výsledky práce a diskusia

Pre vyhodnotenie vplyvu regulačnej prevádzky na splaveninový režim bol navrhnutý prítokovo-odberový graf pološpičkovej prevádzky v zmysle (Dušička, Šulek, 2009). Priemerný prítok do zdrže Hrušov bol uvažovaný $Q_p=2900\text{ m}^3/\text{s}$, pričom sa uvažovalo so 4-hodinovým časovým úsekom so zvýšeným výkonom VE počas dňa na úrovni $Q_{R1}=5000\text{ m}^3/\text{s}$. Po zbytok dňa pracovala VEGA s prietokom na úrovni $Q_{R2}=2000\text{ m}^3/\text{s}$. Regulované odbery $Q_{R1,2}$ boli stanovené s ohľadom na retenčnú kapacitu zdrže Hrušov, podmienku uzatvorenia denného regulačného cyklu a maximálnu hĺtnosť turbín VEGA. Zásobný objem zdrže využívaný na reguláciu prietoku je 38,904 mil. m^3 . Po zohľadnení prítoku starého koryta Dunaja (bolo uvažované s prítokom $400\text{ m}^3/\text{s}$) bola pomocou prítokovo – odberového grafu regulačnej pološpičkovej prevádzky VEGA zostavená horná okrajová podmienka modelu. Doba simulácie bola 10 dní.

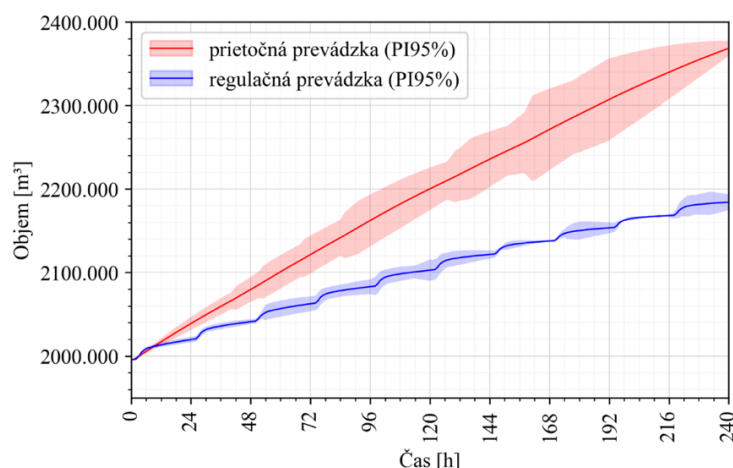
5.1 Objem sedimentu v plavebnej dráhe

Objem sedimentu v plavebnej dráhe bol vyhodnotený pre brodový úsek od rkm 1798.5 do rkm 1799.5. Z odporúčaní DK vyplýva, že pre záujmový úsek je hĺbka plavebnej dráhy 27 dm + dynamické zanorenie v rozsahu od 2 dm do 4 dm v závislosti od plavidla (*kap. 2.2 Plavebná dráha*). Minimálne by mala vodná cesta mať hĺbku 29 dm. Pre brodový úsek rkm 1799 to pri HNR $PV = 107.69\text{ m n. m.}$ predstavuje kótu dna 104.79 m n. m. (Slov. - Maď. Komisia hraničných vôd, 2014). V oboch scenároch dochádza k sedimentácii dnového materiálu, avšak pri regulačnej prevádzke je to cca o polovicu menej (**Error! Reference source not found.**). Objem sedimentu

v plavebnej dráhe na skúmanom brodovom úseku je po 10 dňoch simulovanej prietochnej prevádzky o 183.80 m³ až 184.49 m³ väčší ako pri regulačnej prevádzke – Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Objem sedimentu v plavebnej dráhe v úseku rkm 1798.5 – 1799.5

Scenár	Deň 0 [m ³]	deň 10 [m ³]	rozdiel [m ³]	PI95% [m ³]
Prietočná prevádzka	1995.81	2368.38	372.58	2359.11 - 2377.66
Regulačná prevádzka	1995.81	2184.23	188.43	2174.62 - 2193.85



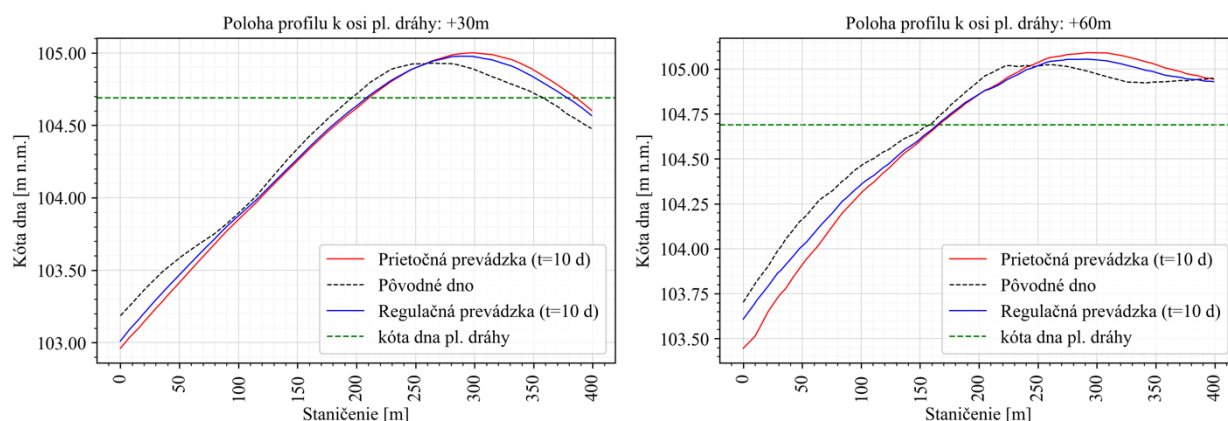
Obr. 5.1 Objem dnového materiálu v plavebnej dráhe v úseku rkm 1798.5 – 1799.5

5.2 Kóta dna na brode

Kótou dna na brode sa rozumie nadmorská výška vrcholu brodu. Spôsob kóty brodu bolo potrebné vopred definovať. Brody totiž nie sú statické riečne útvary ako na príklad skálne prahy. Ich poloha, výška a tvar sa vplyvom transportu sedimentov v čase menia. Bolo preto potrebné zvoliť prístup, ktorý zachytáva túto dynamiku. Vyhodnotenie bolo založené na sade piatich pozdĺžnych profilov v 30 m intervaloch. Pri prietochnej prevádzke ktorá simuluje konštantný prietok 2900 m³/s sa zistilo, že priemerná kóta dna na brode po 10 dňoch bola 104,18 m vo vzdialenosti -60 m od osi plavebnej dráhy, 104,27 m pri -30 m, 104,71 m v osi, 105,00 m pri +30 m a 105,09 m pri +60 m. Pri regulačnej prevádzke s prietokom v modeli v rozsahu 2400 m³/s až 5400 m³/s sa zistilo, že priemerná kóta dna na brode po 10 dňoch bola 104,17 m pri -60 m od osi plavebnej dráhy, 104,27 m pri -30 m od osi, 104,71 m v osi, 104,98 m pri +30 m od osi a 105,06 m pri +60 m od osi. V oboch scenároch je kóta dna v profile +30 m a +60 m vyššie, než je povolené pre bezpečnú plavbu (104.69 m n m). Z porovnania scenárov možno vyvodíť, že kóta dna v plavebnej dráhe je pri regulačnej prevádzke v porovnaní s prietochnou prevádzkou o 3.4 až 3.8 cm nižšie ako pri prietochnej prevádzke (**Error! Reference source not found.**).

Tab. 5.2 Kóta dna na brode po 10 dňoch

Poloha profilu k osi [m]	Pôvodné dno	Prietočná prevádzka		Regulačná prevádzka	
	Kóta dna [m n. m.]	Kóta dna [m n. m.]	PI 95% [m n. m.]	Kóta dna [m n. m.]	PI 95% [m n. m.]
-60	104.20	104.18	104.09 - 104.27	104.17	104.08 - 104.25
-30	104.27	104.27	104.27 - 104.28	104.27	104.27 - 104.28
0	104.75	104.71	104.66 - 104.75	104.71	104.67 - 104.75
30	104.93	105	104.99 - 105.02	104.98	104.97 - 104.99
60	105.03	105.09	105.08 - 105.10	105.06	105.05 - 105.06



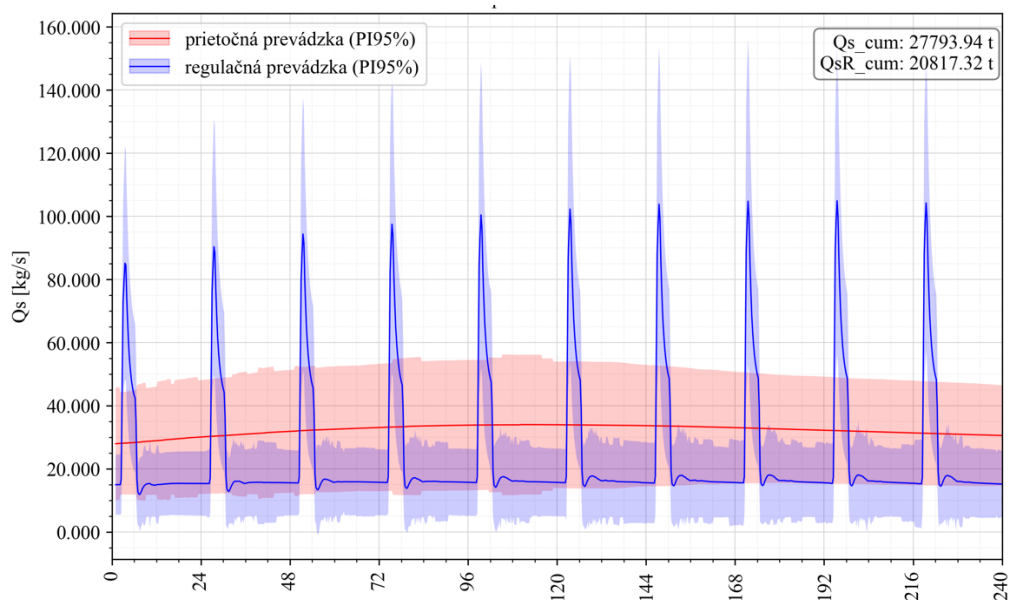
Obr. 5.2 Simulovaný morfologický vývoj brodu v pričnom profile +30 m a +60 m od osi plavebnej dráhy

5.3 Transport splavenín

Transport splavenín bol meraný v kalibračnom profile rkm 1795.58. Vplyv regulácie je jednoznačne pozorovateľný na špičkách transportu sedimentu počas energetickej fázy, kde Q_s regulačnej prevádzky významne prevyšuje Q_s prietocnej prevádzky (Obr. 5.3). Pri prietocnej prevádzke, s konštantným prietokom $2900 \text{ m}^3/\text{s}$ bol počas 10 dní priemerný kumulatívny transport sedimentov 27793.94 ton (Tab. 5.3). Pri regulačnej prevádzke s prietokom v modeli v rozsahu $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ až $5400 \text{ m}^3/\text{s}$ sa zistilo, že priemerný kumulatívny transport sedimentov v profile je signifikantne nižší, na úrovni 20817.32 ton. Z porovnania scenárov možno vyvodíť, že kumulatívny transport sedimentu v pričnom profile rkm 1795.58 je pri regulačnej prevádzke o 6913.87 až 7038.05 ton (~25%) nižší ako pri prietocnej prevádzke. Rozdiel medzi prietocnou a regulačnou prevádzkou je signifikantný, pričom prietocná prevádzka vedie k výrazne väčšiemu transportu sedimentov ako regulačná. Príčinou je pravdepodobne väčšia mobilizácia transportu sedimentov v dôsledku vyššieho konštantného prietoku, čo naznačuje, že periodický nižší prietok regulačnej prevádzky umožňuje ukladanie sedimentov, čo vedie k zníženiu celkového transportu sedimentov.

Tab. 5.3 Kumulatívny transport sedimentov v profile rkm 1795.58

Scenár	Q_{s_cum} [t]	Q_{s_cum} PI95% [t]
Prietocná prevádzka	27 793.94	27 428.62 - 28 164.06
Regulačná prevádzka	20817.32	20 514.75 - 21 126.01



Obr. 5.3 Transport splavenín v profile rkm 1795.58

6 Záver

V teoretickej časti práce bol analyzovaný a identifikovaný vplyv regulačnej prevádzky VE na splaveninový režim toku pod VE v súvislosti s morfológickým vývojom koryta a jeho vplyvom na parametre plavebnej dráhy. V aplikačnej časti práce bol kvantifikovaný vplyv regulačnej prevádzky VEGA na splaveninový režim Dunaja v úseku medzi Sapom (rkm 1810) a Klížskou Nemou (rkm 1791), t. j. v úseku, na ktorom sa nachádzajú v súčasnosti kritické brody. Na riešenie hydromorfológie bol použitý 2D matematický model spoločnosti DHI, Mike21. Hydrodynamický model bol nakalibrovaný na merané hladiny v Medveďove a Klížskej Nemej (RMSE: 0.074 m, MAE: 0.064 m, R^2 : 0.998) (kap. 4.4.2 Kalibrácia hydrodynamického modelu). Následne bol nakalibrovaný model transportu sedimentov na merané hodnoty transportu splavenín (merania rkm 1795.58), (Holubová 2004). V rámci kalibrácie boli zohľadnené a otestované na vhodnosť všetky dostupné transportné rovnice (Engelund-Hansen (1967), Van Rijn (1984), Meyer-Peter Müller (1948), Engelund-Fredsoe (1976)). Na základe štandardných štatistických parametrov bol ako najvhodnejší model zvolený model s transportnou rovnicou Van Rijn (RMSE: 4.08 kg/s, MAE: 3.26 kg/s, R^2 : 0.74) – kap. 4.4.2 Kalibrácia modelu transportu sedimentov. Ako kvantifikačné kritérium vplyvu regulačnej prevádzky VEGA na splaveninový režim bolo zvolené porovnanie morfológických zmien v predmetnom úseku Dunaja a ich vplyvov na parametre plavebnej dráhy v tomto úseku, vyvolaných regulačnou resp. pološpičkovú prevádzkou VEGA a prietokovou prevádzkou VEGA. Bol porovnaný objem deponovaného sedimentu v plavebnej dráhe v úseku rkm 1798.5 – 1799. Výpočty preukázali, že objem deponovaného sedimentu v plavebnej dráhe predmetného úseku bol pri regulačnej (pološpičkovej) prevádzke zhruba o polovicu menší ako pri prevádzke prietokovej a miera zvyšovania kóty dna koryta na brode v rkm 1799 bola pri regulačnej prevádzke zhruba o tretinu nižšia ako pri prevádzke prietokovej. Celkové množstvo pretečeného dnového materiálu profilom rkm 1795.58 bolo pri regulačnej prevádzke o 25% menšie ako pri prietokovej. Z vyššie uvedených výsledkov simulácií transportu splavenín je zrejmé, že pre v práci uvedené konkrétne podmienky prevádzky VEGA má regulačná prevádzka menej negatívny dopad na plavebné hĺbky na brode v rkm 1799 než prietoková prevádzka. V tejto súvislosti je nutné uviesť, že na vyvodenie všeobecnejších záverov by bolo potrebné rozšíriť kvantifikáciu vplyvu regulačnej prevádzky VEGA na splaveninový režim Dunaja resp. vplyvu na parametre plavebnej dráhy, o ďalšie brodové úseky a o väčšiu škálu okrajových podmienok vyplývajúcich z veľkého množstva eventúálnych spôsobov regulačnej prevádzky VEGA, t. j. z veľkého množstva ďalších možných spôsobov prerozdelenia prirodzeného prítoku do zdrže Hrušov prostredníctvom jej zásobného objemu v zmysle teórie pološpičkovej prevádzky regulačnej VE.

7 Zoznam použitej literatúry

Allen, J., 2012. *Principles of physical sedimentology*. Springer Science & Business Media.

Camenen, B., Holubová, K., Lukač, M., Le Coz, J. and Paquier, A., 2011. Assessment of methods used in 1D models for computing bed-load transport in a large river: the Danube River in Slovakia. *Journal of hydraulic engineering*, 137(10), pp.1190-1199.

Dalledonne, G., Kopmann, R., Riehme, J. and Naumann, U., 2017. Uncertainty analysis approximation for non-linear processes using Telemac-AD. In *Proceedings of the XXIVth TELEMAC-MASCARET User Conference, 17 to 20 October 2017, Graz University of Technology, Austria* (pp. 65-71).

DHI, M., 2017. MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM, hydrodynamic and transport module, scientific documentation. *DHI Water & Environment*.

Dunajská Komisia, Odporúčania Dunajskej Komisie pre určenie parametrov plavebnej dráhy, hydrotechnických a iných objektov na Dunaji, Budapešť, 2013

Dušíčka, P., Šulek, P., 2009, Pološpičková prevádzka regulačnej kanálovej vodnej elektrárne s aplikáciou na VE Gabčíkovo, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave

Engelund, F. and Fredsøe, J., 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels. *Hydrology Research*, 7(5), pp.293-306.

Engelund, F. and Hansen, E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K*.

Exner, F.M., 1920. *Zur physik der dünen*. Hölder.

Exner, F.M., 1925. Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen: Gedr. mit Unterstützung aus d. Jerome u. Margaret Stonborough-Fonds. Hölder-Pichler-Tempsky, A.-G..

Bundesanstalt für Wasserbau, für Gewässerkunde, B. and für europäische Binnenschifffahrt, V., 2016. Sedimentdurchgängigkeit der Bundeswasserstraßen im Binnenbereich.

Gómez-Zambrano, H.J., López-Ríos, V.I. and Toro-Botero, F.M., 2017. New methodology for calibration of hydrodynamic models in curved open-channel flow. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (83), pp.82-91.

Habersack, H., Hengl, M., Huber, B., Lalk, P. and Tritthart, M., 2011. Fließgewässermodellierung–Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie. *Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management and Österreichischer Wasser-und Abfallwirtschaftsverband ÖWAV, Vienna*.

Holubová, K., Capeková, Z. and Szolgay, J., 2004, June. Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River. In *River Flow, Proc. 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics* (pp. 135-141).

Holubová, K., Comaj, M., Lukáč, M., Mravcová, K., Capeková, Z. and 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. *Danube Transnational Programme: Bratislava, Slovakia*.

<http://plavba.nsat.sk/riecne-informacne-sluzby/> (31.05.2023)

HYDROCONSULT BRATISLAVA: Dočasný manipulačný poriadok pre uvedenie vodného diela Gabčíkovo do prevádzky dočasným riešením na území SR, textová časť, 1994

HYDROCONSULT BRATISLAVA: Dočasný manipulačný poriadok pre uvedenie vodného diela Gabčíkovo do prevádzky dočasným riešením na území SR, výkresová časť, 1994

Julien, P.Y., 2018. *River mechanics*. Cambridge University Press.

Kikkawa, H., Kitagawa, A. and Ikeda, S., 1976. Flow and bed topography in curved open channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9), pp.1327-1342.

Lukac, M. and Holubová, K., 2016. Numerical modelling of the Danube river channel morphological development at the Slovak–Hungarian river section. In *River Sedimentation* (pp. 682-689). CRC Press.

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

Mahadevan, S. and Sarkar, S., 2009. Uncertainty analysis methods. *US Department of Energy, Washington, DC, USA*.

Melching, C.S., 1992. An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 132(1-4), pp.157-177.

Meyer-Peter, E. and Müller, R., 1948. Formulas for bed-load transport,(pp. 39–64). In Stockholm, Sweden: Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research.

Model, M.F., 2017. Mike21 Flood Screening Tool. Hydrodynamic Module, Scientific Documentation", DHI.

Olesen, K.W., 1989. Bed topography in shallow river bends.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S., 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.

Shields, A., 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement.

Török, G.T. and Baranya, S., 2017. Morphological investigation of a critical reach of the upper Hungarian Danube. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(4), pp.752-761.

Tritthart, M. and Gutknecht, D., 2007. Three-dimensional simulation of free-surface flows using polyhedral finite volumes. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 1(1), pp.1-14.

Van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), pp.1431-1456.

Vasquez, J.A., Millar, R.G. and Steffler, P.M., 2007. Two-dimensional finite element river morphology model. *Canadian journal of civil engineering*, 34(6), pp.752-760.

Villaret, C., Kopmann, R., Wyncoll, D., Riehme, J., Merkel, U. and Naumann, U., 2016. First-order uncertainty analysis using Algorithmic Differentiation of morphodynamic models. *Computers & geosciences*, 90, pp.144-151.

Walters, R.W. and Huyse, L., 2002. Uncertainty analysis for fluid mechanics with applications.

Prehľad publikačnej činnosti

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

Buček, D., Orfánus, M. and Dušička, P., 2019. Assessment of river bed evolution with the aid of 2D hydrodynamic model with integrated sediment transport modeling capabilities. *Pollack Periodica*, 14(1), pp.129-138.

Buček, D., Orfánus, M. and Dušička, P., 2019. Non-intrusive bedload granulometry using automated image analysis. *Pollack Periodica*, 14(3), pp.75-85.

Buček, D., Orfánus, M., Dušička, P. and Šulek, P., 2021. The impact of hydropeaking on sediment transport. *Pollack Periodica*, 16(1), pp.120-125.

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

Šulek, P., Buček, D., 2022. A genetic algorithms approach for optimization of the Gabčíkovo ship locks filling and emptying system. *Journal of Landscape Management*, 13. s. 15--21.

Šoltész, A., Orfánus, M., Buček, D. and Mydla, J., 2022. Flash flood transformation in small catchments. *Journal of Landscape Management*, 13. s. 9--14.

Buček, D., Šulek, P., Orfánus, M. and Dušička, P., 2020. Impact of variable intensity of hydropeaking on river morphodynamics. *Journal of Landscape Management*, 11. s. 12--17.

Bucek, D. and Orfanus, M., 2017. Numerical modelling of hydromorphodynamic development of river restoration scenario. *Journal of Landscape Management*.

Cervenanska, M., Mydla, J. and Soltesz, A., 2019. Water retention measures in the Trnava city as a prevention against droughts.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Buček, D., Orfánus, M. and Dušička, 2018. Comparison of uncertainty analysis methods on numerical hydrodynamic model. In Colloquium on Landscape Management 2018. Brno: *Mendel University in Brno*, s. 3--10. ISBN 978-80-2631-520-9.

Šulek, P. and Buček, D., 2022. Optimization of the operation of the Gabčíkovo ship locks filling and emptying system by differential evolution. In SZYDŁOWSKI, M. WMHE 2022. Gdańsk: *Gdańsk University of Technology Publishers*, s. 191--197. ISBN 978-83-7348-874-8.

Šoltész, A., Červeňanská, M., Živčicová, K., Mydla, J., Buček, D. and Honti, R., 2019. Proposal of Prevention Measures Against Drought in Urban Areas. In World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019). Bristol: *IOP Publishing*.

Buček, D., Orfánus, M., and Dušička, P., 2017. River bed evolution assessment with the aid of numerical model with movable bed. In Colloquium on Landscape Management 2017. Brno: *Mendel University in Brno*, s. 162--167. ISBN 978-80-7509-532-9.

Buček, D., Orfánus, M. and Dušička, P., 2017. Sediment transport assessment based on Shield's diagram. In Colloquium on Landscape Management 2017. Brno: *Mendel University in Brno*, s. 168--174. ISBN 978-80-7509-532-9.

Buček, D., Orfánus, M., and Dušička, P. 2017. Sediment transport assessment on river Morava based on 2D hydrodynamic flow model evaluated with Shield's diagram. In Colloquium on Landscape Management 2017. Brno: *Mendel University in Brno*, 2017, s. 175--181. ISBN 978-80-7509-532-9.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Buček, D., 2018. Aplikácia analýzy neistôt v numerickom hydrodynamickom modelovaní. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: *Spektrum STU*, s. 422--428. ISBN 978-80-227-4864-3.

Buček, D., 2020. Kalibrácia morfodynamického modelu rieky Dunaj v úseku Sap - Klížska Nemá. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: *Spektrum STU*, s. 560--565. ISBN 978-80-227-5052-3.

Červeňanská, M., Živčicová, K., Mydla, J., Šoltész, A. and Buček, D., 2018. Návrh vodozádržných opatrení na Trnávke v intraviláne mesta Trnava. In *Vplyv antropogénnej činnosti na vodný režim nížinného územia*. Bratislava: *Ústav hydrológie SAV*, s. 52--59. ISBN 978-80-89139-41-5.

Buček, D., Šulek, P., Orfánus, M. and Dušička, P., 2019. The impact of hydropeaking on sediment transport. In IVÁNYI, P. Abstract book for the 15th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium. Pécs: *Pollack Press*, ISBN 978-963-429-449-8.

Buček, D., Orfánus, M., and Dušička, P., 2017. 2D hydrodynamic model with movable bed on river Morava. In FÜLÖP, A. -- IVÁNYI, P. *Architectural, Engineering and Information Sciences*. Pécs: *Pollack Press*, s. 26. ISBN 978-963-642-780-1.