Staša VOŠNJAK*
prof. dr. Franci STEINMAN **
prof. dr. Roman KLASINC ***
doc. dr. Primož BANOVEC **

HIDRAVLIČNE RAZMERE OB MOSTNIH OPORNIKIH

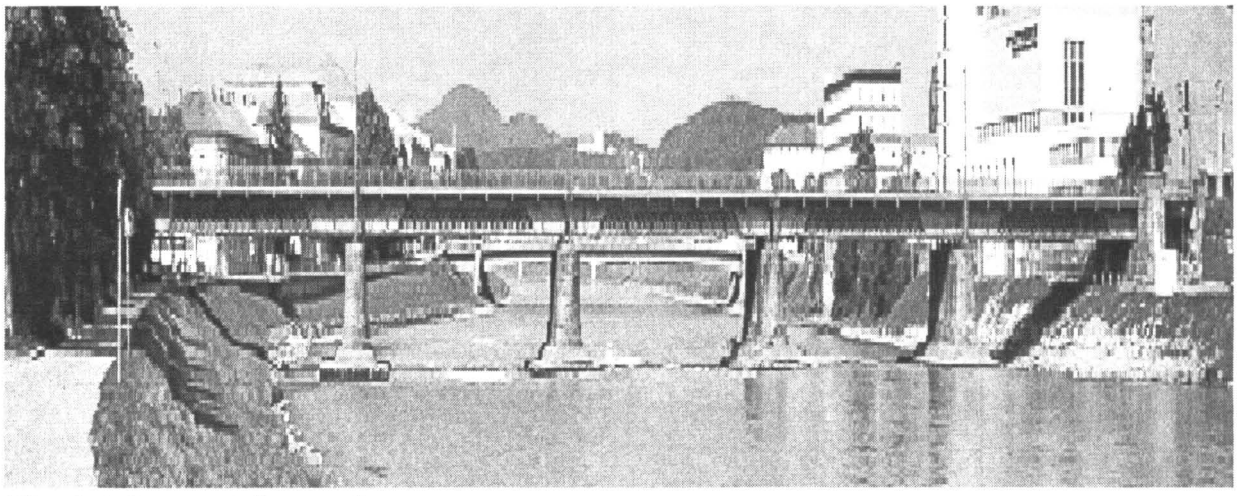
Povzetek

Prikazana bo analiza hidravličnih razmer ob mostnih opornikih. Kot praktični primer je bil modeliran odsek reke Salzach v Avstriji, kjer so danes štirje mostni oporniki za dvotirno železniško progo, predvidena pa je razširitev na tri tire. Ker ni možno prekiniti prometa, bo vzporedno zgrajen nov železniški most z dvema mostnima opornikoma. Takšno število mostnih opornikov povzroča zmanjšanje pretočne sposobnosti, zato je bilo naročeno hidravlično modeliranje na TU Graz, kjer je bil zgrajen fizični hidravlični model. KMTe je sodeloval pri meritvah na fizičnih modelih, opravil pa tudi matematično modeliranje z dvema 2D globinsko povprečenima matematičnima modeloma, ameriškim SMS-RMA2 in kanadskim Aquadyn. V nadaljevanju se bo analiziral še vpliv potrebnega zapiranja vodotoka zaradi gradbenih jam.

KLJUČNE BESEDE: mostni oporniki, fizični hidravlični model, 2D matematični hidravlični model, Aquadyn, RMA2, reka Salzach.

1.0 UVOD

Na obravnavanem odseku reke Salzach, kjer že obstajajo štirje mostni oporniki za dvotirno železniško progo, se bo proga razširila na tri tire, zato bo zgrajen vzporedno nov železniški most z dvema mostnima opornikoma. Ko bo promet nanj preusmerjen, se bo stari most porušil. Veliko število opornikov povzroča lokalne motnje toka in z njimi povezane erozijske procese, za takšne primere pa so matematični modeli še premalo zanesljivi in je bil naročen (fizični) hidravlični model. V okviru sodelovanja med Univerzo v Ljubljani (Katedra za mehaniko tekočin – KMTe) in Tehnično univerzo Graz (TUG, Inštitut za vodne zgradbe in vodno gospodarstvo) pa smo na tem primeru preizkušali še uporabnost (in zanesljivost) dveh komercialnih matematičnih modelov. Meritve na fizičnem hidravličnem modelu smo namreč uporabili za preverbo, kakšne rezultate dajeta 2D (v tlorisni ravnini) globinsko povprečena matematična modela Aquadyn in SMS-RMA2.



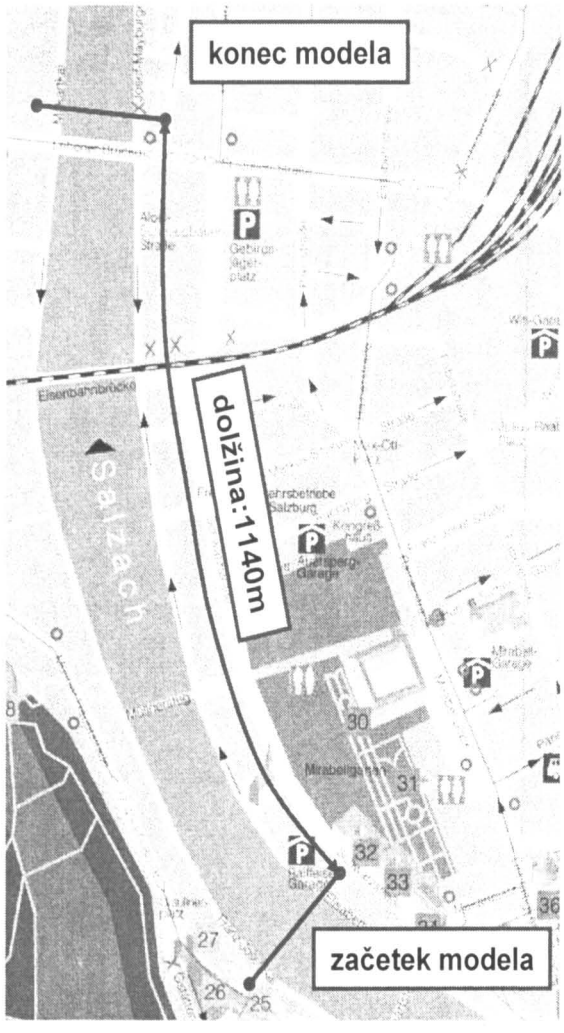
Slika 1: Prikaz mostnih opornikov

* Staša VOŠNJAK univ. dipl. inž. gradb. IHR Ljubljana, **prof. dr. Franci STEINMAN , **doc. dr. Primož BANOVEC, UL FGG, KMeTe, Hajdrihova 28,1000 Ljubljana, ***prof. dr. Roman KLASINC, TUG

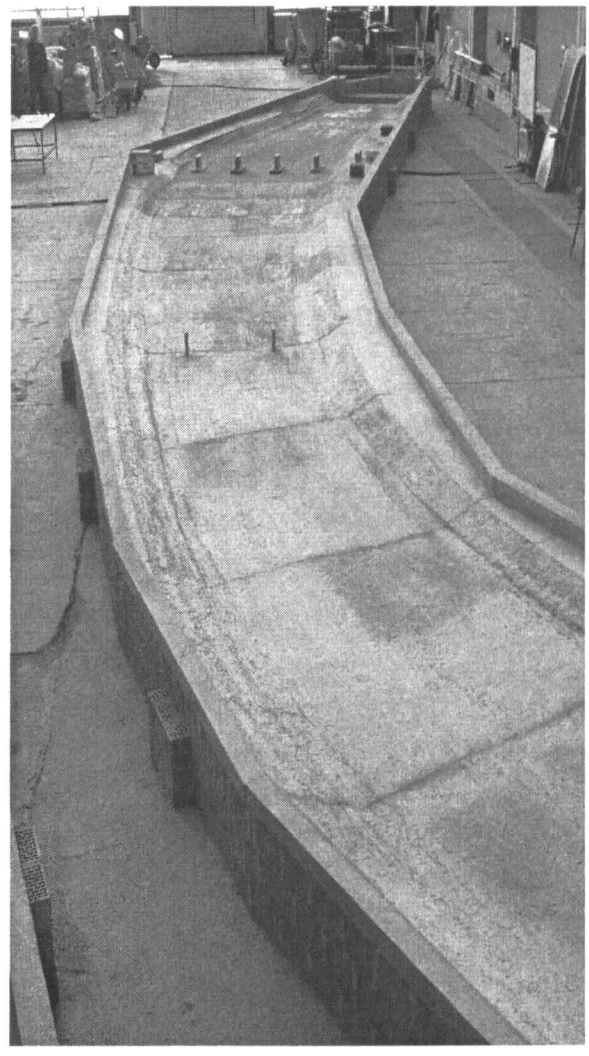
2.0 FIZIČNI HIDRAVLIČNI MODEL

Izdelan je bil fizični hidravlični model v nepopačenem modelnem merilu 1:40. Ponazarja odsek reke Salzach dolžine 1140 m in povprečne širine 120 m. Model ima na večjem območju odseka fiksno dno, le v območju mostnih opornikov in dolvodno od njih je bilo urejeno gibljivo (peščeno) dno. Prvotno se je na območju mostnih opornikov (gibljivo dno) uporabila varianta z modelu primernem finim peskom, ki pa je takoj pokazala, da so erozijski procesi preveliki, zato je fizični model na območju mostnih opornikov predelan, oz. urejen z večjimi kamnitimi zrni, kar v naravi predstavlja bodočo utrditev dna in brežin.

Pri prvotni in pri spremenjeni ureditvi fizičnega modela so bile izvedene meritve gladin, ki so bile potrebne za umerjanje dveh 2D matematičnih modelov. Kasneje smo izvedli še dvoje meritev hitrosti toka na fizičnem modelu, enkrat meritev enodimenzijskih (primarnih) hitrosti in drugič meritev dveh komponent hitrosti (vzdolžno in prečno). Izmerjene hitrosti smo zato lahko primerjali s hitrostmi, izračunanimi s prej že umerjenima matematičnima modeloma.



Slika 2: Prikaz odseka reke Salzach, ki je bil modeliran



Slika 3: Fizični hidravlični model

Model je izdelan tako, da je bil upoštevan Froudeov zakon modelne podobnosti. Za meritve hitrosti so bili uporabljeni naslednji inštrumenti:

- 1D ultrazvočni merilec hitrosti proizvajalca Höntzsch
- 2D ultrazvočni merilec hitrosti (ADV) proizvajalca Nortek

Prvi inštrument sestavljata senzor in ročni prikazovalnik. Omogoča meritve hitrosti in temperature vode v smeri toka (tj. v smeri, v katero je inštrument usmerjen) in deluje na principu Karmanovega pojava

sproščanja vrtincev. Drugi merilec omogoča meritve dveh komponent hitrosti v merilnem volumnu, v katerega sonda ne posega in na kar ne vpliva kakovost vode, zato je široko uporaben (v laboratorijih in na terenu).

Meritve hitrosti so bile opravljene v 12-ih prečnih profilih za dva pretoka. Prvi pretok je bil Q_{10} (v naravi 1520 m^3/s, na modelu 150,2 l/s), drugi pretok je bil Q_{100} (v naravi 2200 m^3/s, kar je na modelu 217,4 l/s). V vsakem profilu smo izmerili hitrosti v treh različnih točkah prečnega preseka. Izvedbo meritev z 1D ultrazvočnim merilcem hitrosti so opravili sodelavci TUG, meritve z 2D merilci hitrosti pa sodelavci KMTe. Na spodnji sliki so prikazani prečni profili in točke na prečnih profilih, v katerih so bile izvajane meritve hitrosti toka, ter oblika gibljivega dna ob mostnih opornikih.

3.0 MATEMATIČNO MODELIRANJE

Za hidravlično analizo smo uporabili matematična modela SMS-RMA2 in Aquadyn, ki sta globinsko povprečeni numerični simulaciji, temelječi na metodi končnih elementov. Pri metodi končnih elementov razdelimo vodno telo na manjše dele (elemente), ki so lahko trikotne ali štirikotne oblike s paraboličnimi stranicami. Elementi so definirani s točkami (vozlišči). Vozlišča so na vogalih elementov, lahko pa tudi (npr. na sredini) stranicah. Vrednosti spremenljivk znotraj končnega elementa se aproksimirajo na osnovi vozliščnih vrednosti in interpolacijskih funkcij.

Geometrijske razmere zajamemo v model najlažje z digitalnim modelom reliefa, na katerega nato dodamo še druge (npr. izmerjene) podatke o geometriji. Za vnos geometrije smo uporabili grafični vmesnik SMS in obravnavano območje zajeli z mrežo, sestavljeno iz 7136 trikotnih končnih elementov, ki je za oba hidrodinamična matematična programa Aquadyn in SMS-RMA2 ista. K izdelani geometriji je treba dodati še robne pogoje. Model RMA2-SMS (za mirni tok, že uporabljen za izračune na Dravi) zahteva v dotočnem in iztočnem prerezu robna pogoja, pretok in gladino vode (izračunana npr. z 1D matematičnim modelom ali izmerjeno v naravi). Enake robne pogoje zahteva tudi Aquadyn, ki pa je hidrodinamičen paket, in omogoča modeliranje stalnega in nestalnega toka v deročem ali mirnem režimu (že uporabljen za prve izračune blatnega toka v Logu zaradi dogodkov na plazu Mangrt). V računu pa lahko upošteva obliko dna (batimetrijo), trenje ob dnu, gravitacijske sile, morebitni vpliv vetra, Coriolisove sile in disipacijo turbulence.

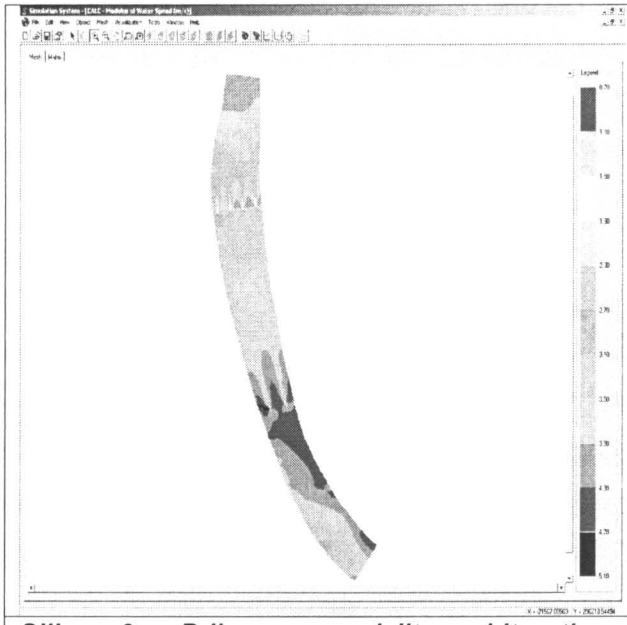
Da bi omogočili primerjavo izračunov iz dveh programov, smo mrežo elementov in celotni digitalni model reliefa naredili z grafičnim vmesnikom SMS, nato pa ga prenesli še v program Aquadyn. Točke mreže so tako v obeh programih iste, enako pa tudi robni pogoji.

4. REZULTATI

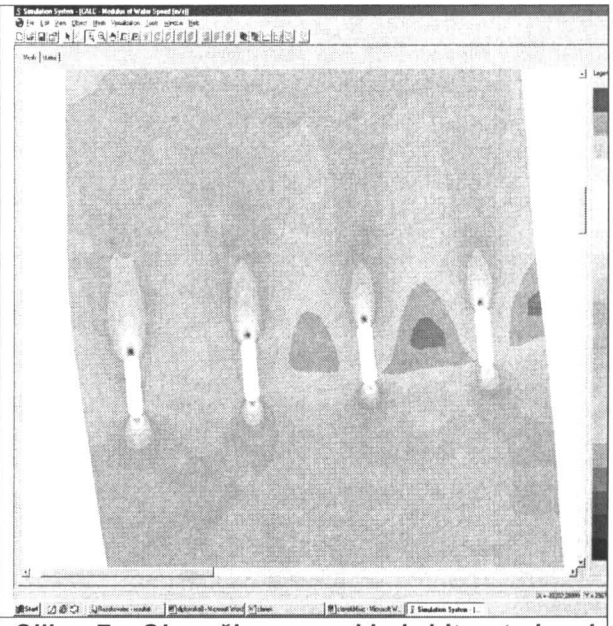
Na podlagi izmerjenih gladin sta bila umerjena oba 2D matematična modela. Njune (numerične) rezultate smo nato primerjali z obema vrstama (1D, 2D) izmerjenih hitrosti na fizičnem modelu. Izračunane hitrosti se (po velikosti) precej dobro ujemajo z izmerjenimi hitrostmi, vendar so opazne razlike tako po razporeditvi hitrosti (npr. položaj matice toka), kot po trendih (npr. večje hitrosti ob konkavnem bregu krivine ipd.). V večini točk so izračunane hitrosti v okviru mej izmerjenih hitrosti in so praviloma večje od 1D izmerjenih hitrosti in manjše od 2D izmerjenih hitrosti.

Porazdelitev hitrosti, ki so bile izračunane s programom Aquadyn se npr. ne ujema z meritvami le v profilih pri mostnih opornikih (ki so pa ravno najbolj zanimivi). Zanimivo je tudi, da se v posameznih profilih porazdelitev 1D meritev ujema z razporeditvijo hitrosti, ki jo je izračunal program Aquadyn, medtem ko so nam meritve 2D prikazale drugačno razporeditev. Kot drugo posebnost lahko opazimo, da je npr. razporeditev hitrosti enaka pri računu s programom Aquadyn in 2D meritvami, medtem ko 1D meritve prikažejo drugačno porazdelitev. Prav tako kot pri programu Aquadyn, se tudi hitrosti, ki so bile izračunane s programom SMS-RMA2 po velikosti precej dobro ujemajo z izmerjenimi hitrostmi, le porazdelitev po prečnem prerezu je precej drugačna, saj so tudi pri programu SMS v večini točk skalarne vrednosti izračunanih hitrosti znotraj izmerjenih hitrosti in prav tako kot pri Aquadynu večinoma večje od 1D izmerjenih hitrosti in manjše od 2D izmerjenih hitrosti.

Prikazali bomo le grafični prikaz porazdelitve hitrosti vzdolž obravnavanega odseka in kot detalj še razmere na območju z mostnimi oporniki. Matematična modela pokažeta, kje nastopajo največje hitrosti, a so med njima takšne razlike, da ni možno na te rezultate nasloniti analizo vlečnih sil (oz. dimenzioniranje utrditve na območju med mostnimi oporniki). Tudi to kaže, da je bila izgradnja fizičnega modela potrebna. Meritve na njem pa so dragocene tudi za nadaljevanje dela, ko bo več pozornosti usmerjeno v analizo vzrokov za različne porazdelitve hitrosti, ki jih dajejo posamezni matematični modeli.



Slika 6: Prikaz porazdelitve hitrosti v horizontalni ravnini (po globini povprečene) za Q_{100}



Slika 7: Območja z enakimi hitrostmi pri mostnih opornikih, izračunana pri pretoku Q_{100}

5. ZAKLJUČKI

Hidravlične analize so v veliki meri zasnovane na eksperimentu, saj enačbe za opisovanje toka vode niso analitično rešljive. Včasih so hidravlične probleme lahko reševali le na fizičnih modelih, nato je bil (pre)velik poudarek le na matematičnih modelih, ki pa so vedno potrebovali nek obseg meritev. Danes se problemi rešujejo z uravnoteženo kombinacijo numeričnih modelov in poizkusov na fizičnem modelu (oz. v naravi). Kljub uporabi najmodernejših računalnikov in opreme, pa so v hidravliki še vedno problemi, ki jih lahko rešujemo le eksperimentalno.

Numerični in fizični modeli morajo z zadostno natančnostjo napovedati obnašanja prototipa oz. stanja v naravi. Zato mora biti vsak model, ko je zgrajen tudi umerjen in preverjen. To pomeni, da morajo biti dogodki, ki jih opazujemo v naravi, dobro reproducirani na fizičnem ali numeričnem modelu. Na fizičnem modelu to dosežemo z izbiranjem fizikalnih značilnosti modela, kot so hrapavost dna ipd., pri numeričnih modelih pa to dosežemo s spreminjanjem koeficientov. Za uspešno umerjanje fizičnega in/ali numeričnega modela pa potrebujemo zanesljive podatke iz prototipa, oz. narave, zato je zbiranje podatkov, ki so potrebni, ponavadi zamudno in drago delo a neizogibno.

Primer iz avstrijske prakse smo uporabili za primerjavo med hidrodinamičnimi veličinami, ki so bile izmerjene na fizičnem modelu in veličinami izračunanimi z 2-D matematičnima modeloma (umerjenima glede na potek gladin). Pri primerjavi smo upoštevali, da so hitrosti, ki so bile izmerjene npr. z 2-D merilcem hitrosti, večje od izračunanih hitrosti, ki so povprečene po globini v posameznih točkah. Primerjava s hitrostmi, ki so bile izračunane z matematičnim modelom Aquadyn in matematičnim modelom SMS-RMA2, kaže dobro ujemanje glede skalarnih vrednosti hitrosti, pač pa tudi odstopanja pri porazdelitvi hitrosti v horizontalni ravnini obravnavanega odseka.

Na odseku z gibljivim dnom, ki je bil modeliran z uporabo fizičnega in matematičnega modela, je prisotno še premeščanje zrn, ki se kotalijo ali drsijo po dnu struge. To je bilo upoštevano na fizičnem modelu, ne pa tudi v matematičnih modelih, kjer pa je uporabljena fiksna geometrija odseka. V nadaljnjem delu bo potrebno dodati še izračune za obravnavo razmer pri gibljivem dnu, kar zahteva dodatni programski modul. Razlike med rezultatoma obeh matematičnih modelov (tudi pri fiksnem dnu) pa kažejo, da je bil fizični model potreben. Nadaljnje meritve variantnih razmer pri zapiranju gradbenih jam, bodo uporabljene za nadaljnje analize o ustreznosti matematičnih modelov, ki so v prodaji na tržišču.

Delo je bilo opravljeno z dobrim sodelovanjem zaposlenih na TU Graz in KMTe, v okviru programa SLO-A-15 iz meddržavnega sodelovanja Slovenije in Avstrije. Za naše razmere pa je zanimivo

predvsem, ker tudi pri nas smo oz. še gradimo vrsto (npr. avtocestnih) mostov, pa primerov, ko bi bile naročeni fizični hidravlični modeli, sploh ni.

LITERATURA:

[1] Agroskin I. I., Dmitrrijev G. T., Pikalov F.I.: Hidraulika, 1973 Tehnička knjiga Zagreb

[2] Banovec, P.: Hidravlična analiza cevi z zarezami, diplomska naloga, 1995 Ljubljana

[3] BOSS International: SMS-Surfacewater Modelling System-7.0 Overview, 6.0 Users Manual

[4] Chanson H.: The hydraulics of open channel flow,1999 Velika Britanija

[5] Carreau, M.: AquaDyn 3.1 Tutorial, Navodila za uporabo, 2000 Montreal

[6] Donell, Barbara P. & King, I.: RMA2 Users Guide

[7] Hojnik T.: 2D model Sore od Puštalskega jezu do mostu v Suhi in ukrepi za izboljšanje poplavne varnosti, zbornik referatov 12. Mišičev vodarski dan 2001, Maribor 2001

[8] Steinman, F.: Hidravlika, Učbenik, 1999 Ljubljana

[9] Širca, A.: Programi za račun gladin stalnega neenakomernega toka v slovenski hidrotehnični praksi, Acta hydrotechnica, Zbornik referatov 16. Goljevščkovega spominskega dne, 1997 Ljubljana

[10] Rajar, R.: Hidromehanika, Učbenik, 1986 Ljubljana

[11] Rajar, R.: Hidravlika nestalnega toka, učbenik, 1980 Ljubljana

[12] Rajar, R., Četina, M.: Matematično modeliranje v hidrotehniki, predavanja za podiplomski študij hidrotehnične smeri

[13] US Army Corps of Engineers-Waterways Experiment Station-Hydraulics Laboratory: GFGEN Version 4.27, Users Guide