

Studium morfologických změn vodních toků a jeho uplatnění při navrhování přírodních blízkých koryt

PETR SKLENÁŘ

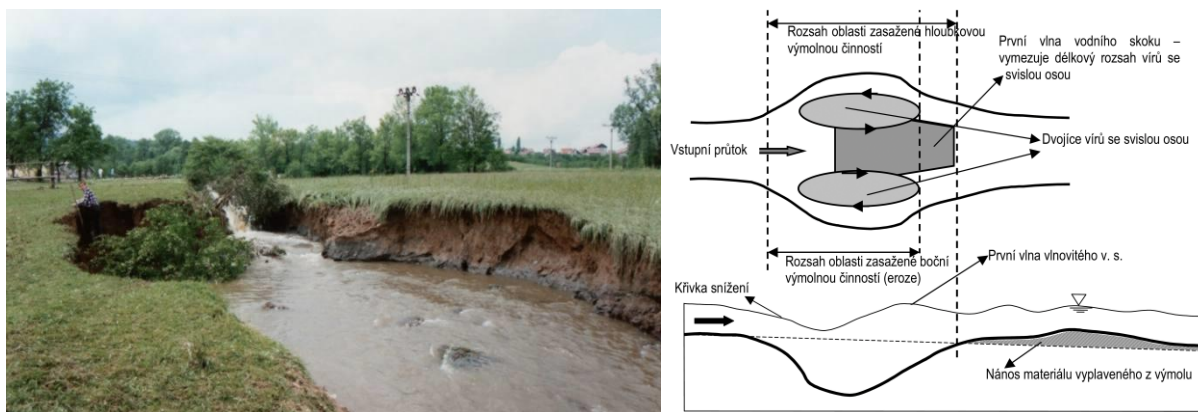
Klíčová slova: proudění v korytě – prostorový výmol – boční a hloubková eroze – fluvialní procesy – disipace energie – návrh revitalizačních úprav

ABSTRAKT

Klimatická změna se projevuje na řadě míst výrazně prostorově lokalizovanými přívalovými srážkami s krátkou dobou svého trvání, zato však s velkou intenzitou. Jako jeden z očekávaných důsledků takového typu srážek je i vznik bleskových povodní, vyznačujících se prudkým vzestupem z hodnoty běžného průtoku na hodnotu kulminačního průtoku a opětovného rychlého poklesu. Důsledkem výskytu tohoto typu epizodálních povodňových jevů je iniciace morfologických přeměn v korytech menších a středních podhorských vodních toků, často až s devastujícími účinky pro úsek koryta vodního toku. Článek shrnuje výzkum vzniku a vývoje výmolu v úseku na přechodu z opevněného koryta s tvarově fixovanými břehy a dna koryta, které může být zcela nekontrolovaně morfologicky přetvářeno. Hlavní pozornost byla v rámci tohoto výzkumu věnována formulaci parametrického modelu morfologického vývoje výmolu na přechodu mezi opevněným a neopevněným (rozvolněným) korytem. Poznatky z tohoto modelu mohou být využity jak pro pochopení hydraulicko-morfologických procesů, jež vznikají v místě náhlé přeměny koryta, tak i pro praktický návrh revitalizačních úprav koryta na přechodu od plně opevněného koryta ke zcela rozvolněnému korytu.

ÚVOD

Revitalizační úpravy koryt vodních toků představují jedno z adaptačních opatření v oblasti snižování dopadu sucha na vodní režim krajiny. Tato adaptační opatření patří mezi nosná témata výzkumné činnosti projektu SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“. Jde zejména o oblast návrhu opatření vedoucích ke snížení povodňových rizik se zaměřením na aspekty ovlivnění povodní změnou klimatu. Rovněž sem spadá výzkum dopadu klimatické změny na ekosystémy a snížení důsledků antropogenního ovlivnění vodního a na vodu vázaného prostředí a vytváření podmínek pro zlepšení ochrany ekosystémů. Revitalizace koryta vodního toku je dnes v užším hydromorfologickém měřítku vnímána jako soubor opatření, jež umožňují utváření koryta za přítomnosti širokého spektra korytotvorných, především fluvialních procesů. K těmto procesům patří v korytech vodních toků i vytváření hydraulických proudových struktur – např. kontrakce a expanze proudu, vznik úplavů s přítomností vírů s vertikální osou a vznik vodního válce s vodorovnou osou jako součást vodního skoku. Dále pak vznikají erozní, transportní a sedimentační procesy, které jsou navázány na předchozí hydraulické jevy. Závisí na geomechanických vlastnostech materiálu, v němž se koryto přetváří, a na stabilitě břehů, které se svou deformací výrazně podílejí na proměnlivé geometrii koryta. Při návrhu revitalizačních úprav je vhodné vycházet právě z poznatků a pozorování sukcesních procesů podílejících se na přetváření koryta. Výrazné morfologické změny lze pozorovat v terénních podmínkách během průchodů bleskových povodní i po nich, kde morfologické změny mají značně akcelerovaný průběh. Dále lze morfologické změny pozorovat při cíleném fyzikálním výzkumu v laboratorních podmínkách, v nichž lze detailněji sledovat a vyhodnotit průběh procesu, který by však měl být pokud možno verifikován pro podmínky, jež jsou co nejbližší reálným korytům. V tomto příspěvku se autor věnuje vzniku a vývoji prostorového výmolu, pro svůj charakteristický tvar často nazývaného „výmol – hruška“, který vzniká na přechodu mezi opevněným a neopevněným korytem. To dobře odpovídá i revitalizačním úpravám vodních toků v minulosti, poznamenaným soustavnou meliorací, při níž docházelo k odstraňování opevnění v celých úsecích koryta.



Obr. 1. Vývoj „výmolu – hrušky“ iniciovaného porušením spádového stupně při povodni (vlevo); schematické naznačení charakteru proudění v přechodové oblasti prostorového výmolu (vpravo)
 Fig. 1. Development of the “pear shaped” scour resulting from degradation of a drop structure on flash flood occurrence (left); feature of flow in transitional zone of the spatial 3D scour (right)

Výzkum výmolu v přechodové oblasti rozvolněného koryta

Problematikou stabilizace rozvolněného koryta v jeho rozšíření se již dříve zabývala řada autorů, namátkou [3, 7]. Výzkum VÚVH Bratislava [3], který se svým charakterem asi nejvíce blížil této studii prostorového výmolu, přijal jako první pro tento morfologický objekt na vodním toku pracovní označení „hruška“ (obr. 1 vpravo). Ačkoli byl výzkum proveden na modelu objektu typu „hruška“ v několika tvarových alternativách, a to i s uvažováním vlivu transportu splavenin z horních částí vodního toku, nebyly uvedeny kromě obecných doporučení pro konstrukci těchto objektů metody jejich hydrotechnického řešení.

Vlastní výzkumný projekt autora, zabývající se morfologickými změnami na malých, relativně strmých podhorských vodních tocích za vysokých průtoků, byl prováděn ve dvou etapách:

1. Terénní šetření s pozorováním reakce koryt na přirozené nebo uměle vyvolané morfologické změny. Cílem této etapy bylo provést kvalitativní popis změn.
2. Laboratorní modelové experimenty, které byly zaměřeny na návrh kvantitativního modelu morfologických přeměn se schopností předpovídat morfologickou odezvu koryta při použití ekologicky šetrných a nákladově efektivních revitalizačních opatření.

V části projektu s cílem umožnit kvantifikaci morfologických změn probíhal soustavný výzkum v laboratorních podmínkách na dvou odlišných typech modelu koryta v přechodové oblasti. Pro komplexnější popis chování modelu byla zvolena „úplná prostorová“ realizace koryta v přechodové oblasti jeho rozvolnění (obr. 2 vlevo). Pro urychlení postupu dokumentace okamžitého vývoje výmolu prohlubně koryta byla navržena realizace symetricky zjednodušeného „polovičního“ koryta (obr. 2 vpravo). Osou symetrie koryta zde byla skleněná stěna hydraulického žlabu, v němž bylo koryto ve vstupní opevněné části i přechodové rozvolněné části vytvořeno. Tato druhá realizace umožňovala velmi rychle zachytit průběh hladiny a dna v podélném směru prakticky v daném okamžiku. Pro urychlení geometrického zaměření hladiny i dna byla využita optická přístupnost přes skleněnou boční stěnu žlabu. Taktéž proměření rychlostních polí v přechodové oblasti koryta bylo možno provést výrazně rychleji než při úplné prostorové realizaci koryta. Je zřejmé, že předpoklad symetrie byl i z hlediska reálného vývoje koryta v rozvolnění zjednodušujícím předpokladem, který bylo nutno v další fázi projektu verifikovat s úplnou prostorovou realizací modelu koryta. V zásadě by neměly být žádné objektivní důvody pro výrazně nesymetrický vývoj výmolu, pokud k tomu ovšem nejsou vytvořeny zvláštní podmínky. Další podrobnosti o výzkumu jsou popsány v literatuře [5, 6] a pro stručnost zde nejsou uvedeny.



Obr. 2. Úplný prostorový model koryta v přechodové oblasti vývoje výmolu (vlevo); poloviční model koryta s osou symetrie ve skleněné stěně žlabu (vpravo) – vše v laboratorních podmínkách

Fig. 2. Full space model of the channel in the transition zone of scour hole development (left); symmetric half-space model of the channel with axis at the flume glass wall (right) – all under laboratory conditions

Pozorovaný vývoj výmolu v úplném modelu koryta

Na základě pozorování sukcesního vývoje prostorové prohlubně výmolu v nekohezních materiálech lze shrnout dílčí poznatky (viz schéma na obr. 1 vpravo):

- Na přechodu mezi pevným a deformovatelným korytem začíná celý proces vznikem malé prohlubně ve dně tak, jak k tomu dochází i u širokých koryt. Při samovolném utváření prahu ve dně na přechodu mezi koryty vzniká proudění charakteru vodního skoku. Nejříve jde o proudění s povrchovým válcem nebo o vlnovitý vodní skok.
- S rostoucí hloubkou prohlubně nemění toto proudění v podélné rovině výrazně svůj charakter. Jakmile prohlubeň dosáhne pat svahů, dojde k poruše jejich stability a malé části nebo i celé bloky materiálu začnou sjíždět do prohlubně. Svahy přetvárného koryta v blízkosti své paty již plynule nenavazují na svahy pevného koryta. Dochází zde k odtrhávání proudu od stěny a vznikají první boční víry u pat obou svahů.
- Boční víry začínají postupně narůstat a silít. Hlavní část své cirkulační energie dostávají od hlavního proudu v blízkosti osy koryta. Boční válce se z obou stran rozpínají, stlačují středový proud a vedou k jeho šířkové kontrakci. Znásobuje se tím jeho tečný účinek u dna a od tohoto okamžiku postupuje prohlubování výmolu velmi rychle.
- Čím více se výmolová prohlubeň rozšiřuje do stran, tím rozvinutější je cirkulační struktura bočních válců. Materiál písku, unášený ze dna silným proudem vodního skoku v blízkosti podélné osy koryta, je zčásti odnášen pryč z oblasti výmolu a zčásti je cirkulován v bočních válcích. Pohyb jednotlivých částic písku v cirkulačních oblastech probíhá od středu proudu do stran ke svahům, odsud podél bočních svahů protiproudě a zpětně je nasáván do hlavního proudu v ose koryta.
- Jakmile se tento cirkulační splaveninový proces ustálí, začne se další vývoj maximální hloubky výmolu zpomalovat. Hlavní proud má již totiž částečně vyčerpanou transportní kapacitu materiálem, který je cirkulován v bočních válcích. Tento materiál zpětně vstupuje do hlavního proudu vždy, když jej proudění v bočních válcích posune u dna do osy koryta.

Někdy je šířka bočních válců již natolik velká, že zpětný proud podél svahů nemá dostatečnou sílu odebírat materiál ze dna. Výmol se prohlubuje více u středu, na okrajích se prohlubuje méně nebo vůbec. V takovýchto případech je dno na okrajích výmolové prohlubně velmi ploché a u středu koryta se příkře svažuje k místu maximální hloubky celého výmolu. Vytvářejí se zde jakési postranní plošiny s jednou úzkou hlubokou prohlubní uprostřed profilu.

Hydraulická východiska studia výmolu

Jelikož v místě prostorového výmolu vzniká vodní skok, jehož charakteristiky je možno získat aplikací věty o hybnosti, lze zcela přirozeně uvažovat o tom, že i řešení prostorového výmolu bude vycházet z tohoto principu. Věta o hybnosti umožňuje přesné řešení při navrhování dimenzí vývarů konstantní šířky, pro případ prostorového výmolu tvaru hrušky je však šířka proměnná. Je potřeba počítat i s tlakovou normálovou silou, kterou je reakce stěn objektu „hrušky“, i když v případě deformovatelných stěn ani toto zcela neplatí. Půdorysně není rozměr vodního skoku z bočních stran vymezen pevnými stěnami, ale kontaktními plochami s bočními válci (*obr. 1 vpravo*). Vzhledem k tomu, že v kontaktní ploše ze strany bočních válců se svislou osou má voda obvodovou rychlost danou prouděním ve víru, nelze počítat pouze s velikostí normálové síly, ale též s tečnou silou. Kromě toho nemusí být rozdělení tlaků ve vstupním profilu vždy hydrostatické a hybnost proudu ve výstupním profilu je v důsledku nerovnoměrného rozdělení rychlostí v příčném profilu ovlivněna i velikostí Boussinesqova čísla (poměr skutečné hybnosti proudu k hybnosti vyjádřené z průřezové rychlosti). Z předchozího je tedy zřejmé, že prostá aplikace věty o hybnosti nevede k cíli. Jako nadějnější se jeví návrh autora, jenž po vzoru Hunzingera [4] dává do vzájemné závislosti bezrozměrnou délku úplavu vznikajícího v rozšíření proudu:

$$\lambda_w = \frac{2L_w}{B_2 - B_1} \quad (1)$$

a parametr F vzájemné přeměny kinetické a polohové energie v důsledku rozšíření (*rov. 2*).

$$\lambda_w = 2,2 - 2,8 \ln(1 - F) \quad (2)$$

Bezrozměrný parametr F definoval Ashida [1] vztahem:

$$F = \left(\frac{V_2^2}{V_1^2}\right)^{1,1} \left(\frac{h_{p2}}{h_{p1}}\right)^{2,1} \quad (3a),$$

což je vyjádření přeměny energie v přechodové oblasti mezi vstupním profilem 1, kde je původní nezměněná šířka koryta, a profilem 2, kde je naopak šířka výmolu do stran největší. Důvod, proč by parametr energetické přeměny F mohl být dobrým indikátorem tendence k vytváření prostorového výmolu tvaru „hrušky“, plyne z úvahy, že čím více energie (kinetické i polohové) se přemění v bilančním úseku v disipativní formu energie a v část energie uplatňující se při transportu materiálu koryta, tím lze očekávat větší přetvárné účinky proudu na morfologii koryta, a tím bude i větší prostorový rozsah vzniklého výmolu. Všechny veličiny vystupující ve vztahu (3a) jsou uvedeny na *obr. 3*. V tomto definičním obrázku je význam uvedených hodnot následující:

V_1, V_2 [m.s⁻¹] – průřezové rychlosti v příslušném profilu

A_1, A_2 [m²] – průtočné plochy v příslušném bilančním profilu

$c \cdot A_2$ [m²] – část průtočné plochy v profilu 2, zmenšená o recirkulační oblasti bočních vírů

H_1 [m] – hloubka proudění v bilančním vstupním profilu 1

h_{p1}, h_{p2} [m] – polohové výšky hladiny na vstupu do výmolu a v místě výmolu měřené od nejnižší úrovně dna výmolu

$\Delta H_P = h_{p1} - h_{p2}$ [m] – rozdíl polohových výšek hladin v bilančních profilech

Y_s [m] – hloubka výmolu „hrušky“

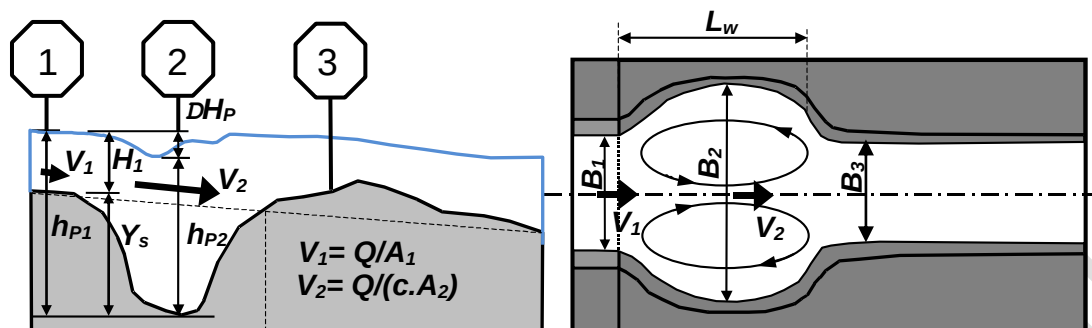
L_w [m] – celková délka výmolu „hrušky“

B_1, B_2, B_3 [m] – šířky proudu v hladině na vstupu do výmolu, ve výmolu a těsně za výmolem

V *rov. 3a* je však uvažována jediná průřezová rychlost v celém profilu 1 a 2. Na základě vlastního výzkumu rozdělení bodových rychlostí v přechodové oblasti vývoje výmolu [5] lze doporučit modifikaci členů průřezových rychlostí v profilech 1 a 2 příslušnými koeficienty kinetické energie profilu (Coriolisovo číslo α_c), zahrnujícími poměr skutečné kinetické energetické výšky k energetické výšce vyjádřené ze střední průřezové rychlosti.

$$F = \left(\frac{\alpha_{e2} V_2^2}{\alpha_{e1} V_1^2} \right)^{1,1} \left(\frac{h_{p2}}{h_{p1}} \right)^{2,1} \quad (3b)$$

V bilančním vztahu (rov. 3b) je třeba věnovat zvláštní péči vhodné volbě polohy obou bilančních profilů – zejména pak profilu 2 (obr. 3).



Obr. 3. Typická podoba výmolu „hrušky“ v podélném profilu (vlevo) a v půdorysu (vpravo) se základními rozměry vyznačenými v charakteristických profilech výmolu

Fig. 3. Typical form of the “pear” shaped scour hole in a long section (left) and a plan view (right) with basic dimensions marked at characteristic profile of scour hole

Metodika stanovení změn koryta

Hlavním úkolem tohoto příspěvku je na podkladu předchozích sledování [5, 6] navrhnout jednoduchý postup pro stanovení rozměrů prostorového výmolu, jenž vzniká na přechodu od opevněného k plně rozvolněnému korytu bez jakéhokoli technického zajištění. Postup by měl být co nejjednodušší, umožňující stanovit rozsah morfologických změn koryta bez potřeby znalosti příliš mnoha detailů, které lze stanovit většinou jen v laboratorních podmínkách.

Vztahy pro stanovení základních rozměrů prostorového výmolu

Postup měření na „plném“ prostorovém modelu byl velmi pomalý a zdoluhavý. Nedařilo se zaměřovat časově si odpovídající průběhy hladiny a dna v podélném profilu a obou bilančních příčných profilech. Pro systematické měření bylo proto nutné přístup omezit na poloviční koryto. Veškerá vyhodnocovaná experimentální data v grafech na obr. 4 pocházejí právě z těchto měření.

Pro říčního inženýra není příliš praktické používat vzorec ve tvaru rov. 3b, např. kvůli nedostatku znalostí o rozložení lokálních rychlostí v profilu 1 a hlavně 2 (obr. 3), kde vznikají boční víry. Je třeba využít některé náhradní přímochařejší vztahy. Nabízí se vztah mezi F a $\beta = B_2/B_1$ vyneseny na obr. 4 (graf 1). Je zřejmé, že F není pouze funkcí geometrických rozměrů výmolové prohlubně, ale souvisí také s vlastnostmi proudění před vstupem do přetvárného koryta. Proto je navržen vztah: $F = F(\beta, Fr_1)$, kde Fr_1 je Froudovo číslo proudění ve vstupním úseku 1 definované vztahem $Fr_1 = V_1/(gH_{1str})^{0,5}$, kde H_{1str} je střední hloubka proudění $H_{1str} = A_1/B_1$, A_1 je plocha proudění v bilančním profilu 1 a B_1 je šířka proudění v hladině ve stejném úseku. Byl odvozen exponenciální vztah (rov. 4), který přirozeně splňuje logickou podmínku $F = 1$ pro poměr rozšíření koryta $\beta = B_2/B_1 = 1$.

$$F = 0,084 \exp \left(\frac{2,48}{\beta^{0,85} Fr_1} \right) \quad (R^2 = 0,867 - \text{viz obr. 4 – graf 1}) \quad (4)$$

Vztah získaný prokladem experimentálně zjištěnými body dosahuje součinitele determinace $R^2 = 0,867$.

Dále byl z experimentálních dat (obr. 4 – graf 2) získán vztah mezi bezrozměrnou délkou úplavu λ_w v analogii s Hunzigerovým vztahem (rov. 2). Vztah zohledňuje závislost geometrických rozměrů, podílejících se na vyjádření bezrozměrné veličiny λ_w , na parametru energetické přeměny mezi profily 1 a 2, a navíc zohledňuje i podmínky (Fr_1) na přítoku do přechodové oblasti koryta, kde se výmolová prohlubeň vyvíjí.

$$\lambda_w = 1,47 - 0,65 \ln(1 - F) Fr_1 \quad (R^2 = 0,978 - \text{viz obr. 4 – graf 2}) \quad (5)$$

Zkušebnosti z výzkumu tvaru výmolu, který vzniká účinkem ponořeného vodorovného paprsku na deformovatelné dno [2], ukazují, že tvar výmolu v jednotlivých okamžicích svého vývoje je podobný – afinní (obr. 5). Lze zjistit i zřejmou podobu mezi pozorovaným tvarem hladiny a dna v podélném profilu (obr. 1 vpravo). Proto je třeba hledat vztahy mezi základními geometrickými parametry výmolové prohlubně (B_2 , B_3 , L_w a Y_s) a také mezi úrovněmi vodní hladiny ($\Delta H_p = h_{p1} - h_{p2}$) a dna (Y_s). Další odvozené vztahy (rov. 6, 7 a 8) čerpané z experimentálně získaných dat (obr. 4 – graf 3, 4 a 5) byly určeny opět pomocí statistické analýzy [5, 6].

$$B_2 = 1,58L_w + 0,14 \quad (R^2 = 0,992 - \text{viz obr. 4 – graf 3}) \quad (6)$$

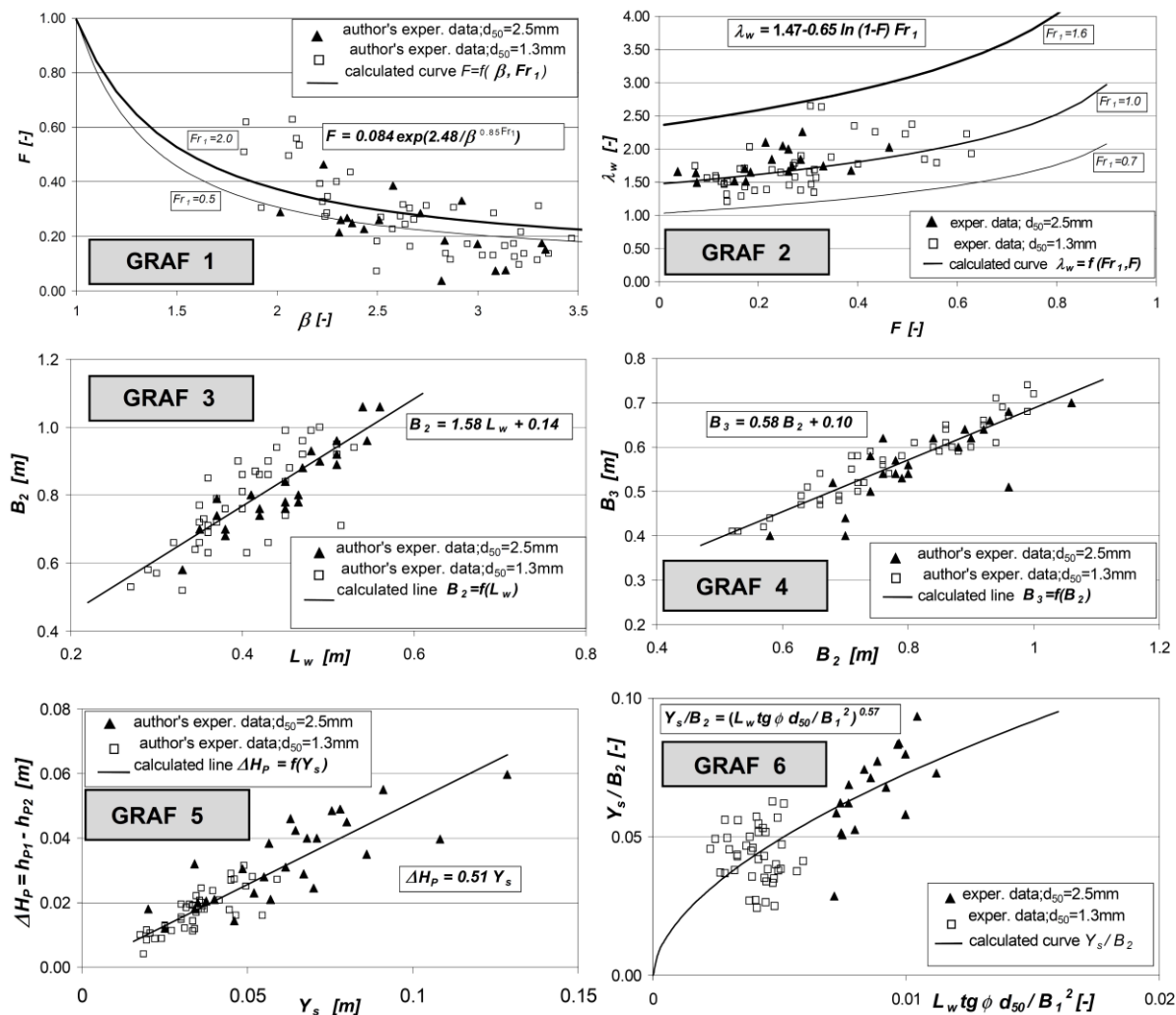
$$B_3 = 0,58B_2 + 0,10 \quad (R^2 = 0,978 - \text{viz obr. 4 – graf 4}) \quad (7)$$

$$\Delta H_p = 0,51Y_s \quad (R^2 = 0,923 - \text{viz obr. 4 – graf 5}) \quad (8)$$

Poslední statisticky odvozený vztah z experimentálně získaných dat na „polovičním“ modelu rozvolněného koryta je patrný na obr. 4 z grafu 6.

$$\frac{Y_s}{B_2} = \left(\frac{d_{50} \tan \varphi}{B_1} \cdot \frac{L_w}{B_1} \right)^{0,57} \quad (R^2 = 0,955 - \text{viz obr. 4 – graf 6}) \quad (9)$$

Autor si je vědom skutečnosti, že rov. 9 může mít i jiný než navržený tvar se zastoupením řady dalších kombinací bezrozměrných veličin. Z celé řady prověřovaných vztahů mezi bezrozměrnými veličinami byl dle [6] vybrán právě uvedený tvar na základě nejlepší dosažené kritériální hodnoty optimalizačního procesu (R^2) při zahrnutí minimálního počtu parametrů určených k optimalizaci (pouze mocninný exponent), což mělo pozitivní vliv na malou chybu v jejich hodnotě. Tato rovnice vzájemně svazuje všechny tři hlavní veličiny geometrie výmolu L_w , B_2 , Y_s s veličinou B_1 na vstupu do výmolu v závislosti na geomechanických vlastnostech zeminy ($\tan \varphi$, d_{50}).



Obr. 4. Odvozené experimentální vztahy pro návrh výmolové prohlubně v přechodové oblasti rozvolněného koryta; grafy 1–6 jsou odkazovány ve schématu návrhu výmolové prohlubně (obr. 6)

Fig. 4. Relationships derived to design preformed scour hole at channel transition; graphs 1–6 are referred in chart of design procedure of the scour hole (fig. 6)

Kromě definiční rovnice parametru energetické přeměny (rov. 3a) a navržených empirických rovnic (rov. 4–9) lze v souladu s obr. 3 ještě odvodit základní vazební rovnice pro polohové výšky v bilančních profilech 1 a 2.

$$h_{p1} = Y_s + H_1 \quad (10)$$

$$h_{p2} = Y_s + H_1 - \Delta H_p \quad (11)$$

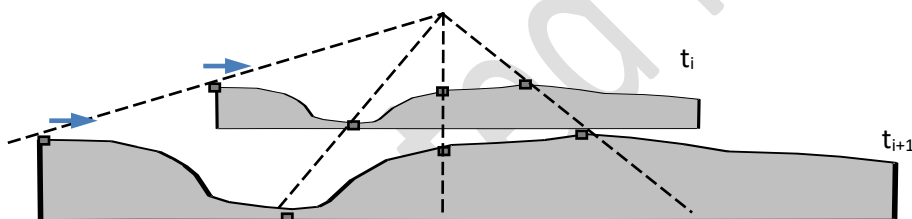
Poslední vazební rovnicí je výraz pro vyjádření bezrozměrné délky úplavu, kde L_w je délka úplavu odpovídající přibližně délce výmolové prohlubně.

$$\lambda_w = \frac{2L_w}{B_2 - B_1} \quad (12)$$

Pro návrh rozměrů morfologického objektu byly odvozeny všechny potřebné kvantitativní vztahy. Všechny vztahy jsou rozměrově homogenní, jsou uvedeny ve formě závislosti geometrických rozměrů výmolové prohlubně (rov. 6, 7, 8, 10, 11) nebo závislosti bezrozměrných parametrů (rov. 3a, 4, 5, 9, 12). Tyto vzorce používají jako vstupní údaje hlavní geometrické a hydraulické charakteristiky vstupního proudu (B_1 , H_1 , V_1 , Fr_1) v úseku koryta před rozvolněním toku a geomechanické vlastnosti nesoudržného materiálu v rozvolněné části (úhel sklonitosti zeminy pod vodou ϕ a reprezentativní velikost zrna zeminy d_{50}). Je třeba upozornit, že v případě aplikace experimentálně

odvozených rovnic je nutné vycházet z platnosti těchto vztahů pro určité rozmezí použitých bezrozměrných parametrů. Bezrozměrné vztahy (rov. 4, 5 a 9) byly odvozeny v rozmezí parametru Fr_1 (0,75; 1,9) – tj. spíše v podmínkách charakteristických pro podhorské až horské potoky. Poměr rozšíření koryta $\beta = B_2/B_1$ ve výmolové prohlubni v experimentech odpovídal rozmezí (1,8; 3,5), tj. podmínkám proudění s dobře až velmi dobře rozvinutými bočními víry, které se výrazně podílejí na formování prostorového výmolu s charakteristickým tvarem „hrušky“. Bezrozměrné parametry výmolu byly v tomto rozmezí: B_2/H_{1str} (15; 50), L_w/H_{1str} (7; 23) a Y_s/H_{1str} (0,6; 2,7). Parametr energetické přeměny F se pohyboval v rozmezí (0,04; 0,8). Experimenty probíhaly pouze na dvou typech zrnitého nesoudržného lože, tvořeného významně stejnozrnnými ostrohrannými sklářskými písky FP 1–1,6 a FP 1,6–4 mm se zrnem $d_{50} = 1,3$ mm a 2,5 mm a s čísly nestejnozrnosti $U = d_{60}/d_{10}$ 1,5, resp. 1,7. Specifická hmotnost písku byla pro oba případy 2 516 kg/m³ a objemová hmotnost 1 560 a 1 600 kg/m³. Úhel vnitřního tření pod vodou byl u jemnozrnnějšího písku 33,8° a hrubšího písku 35,9°.

Změny všech relevantních geometrických rozměrů, jež jsou spojeny se vznikem a vývojem výmolu, jsou závislé na parametru, kterým je čas – lze tedy hovořit o „parametrickém výmolu“ [2]. V případě návrhu výmolu tvaru „hrušky“ jako stabilizovaného výmolu je třeba vycházet z jednoho známého rozměru výmolu. V praxi je častým omezením pro návrh výmolu typu „hrušky“ limitovaná šířka přilehlého příbřežního pásu, kde není nutné řešit komplikované vztahy s vlastníky okolních pozemků. Bude tedy volen tento limitovaný rozměr, odpovídající veličině B_2 ; je možno však volit i kterýkoli z ostatních rozměrů (Y_s , L_w). Touto volbou je do výpočtu vnesen nepřímý faktor času. Projektanta výmolu tvaru „hrušky“ nemusí zajímat, v jakém čase t by k vytvoření výmolu o výpočtem zjištěných dimenzích došlo. Podstatná je pro něj skutečnost, že jím zvolená dimenze výmolu (v čase t proměnná) je limitní, za níž již nelze jít, a že tvarově výmol odpovídá některému z afinních mezistavů (obr. 5), korespondujících s aktuálním rozsahem dvojice svislých vodních válců. Výmol typu „hruška“ je pak třeba ve výpočtem stanovených dimenzích stabilizovat, např. zapuštěnými záhozovými žebry ve dně i na svazích na začátku a konci objektu. Konkrétní technické opatření stabilizace výmolu však musí vycházet z místních zvyklostí na daném vodním toku, respektujících zejména charakter zemin v nivních uloženinách a dostupnou materiálovou základnu.



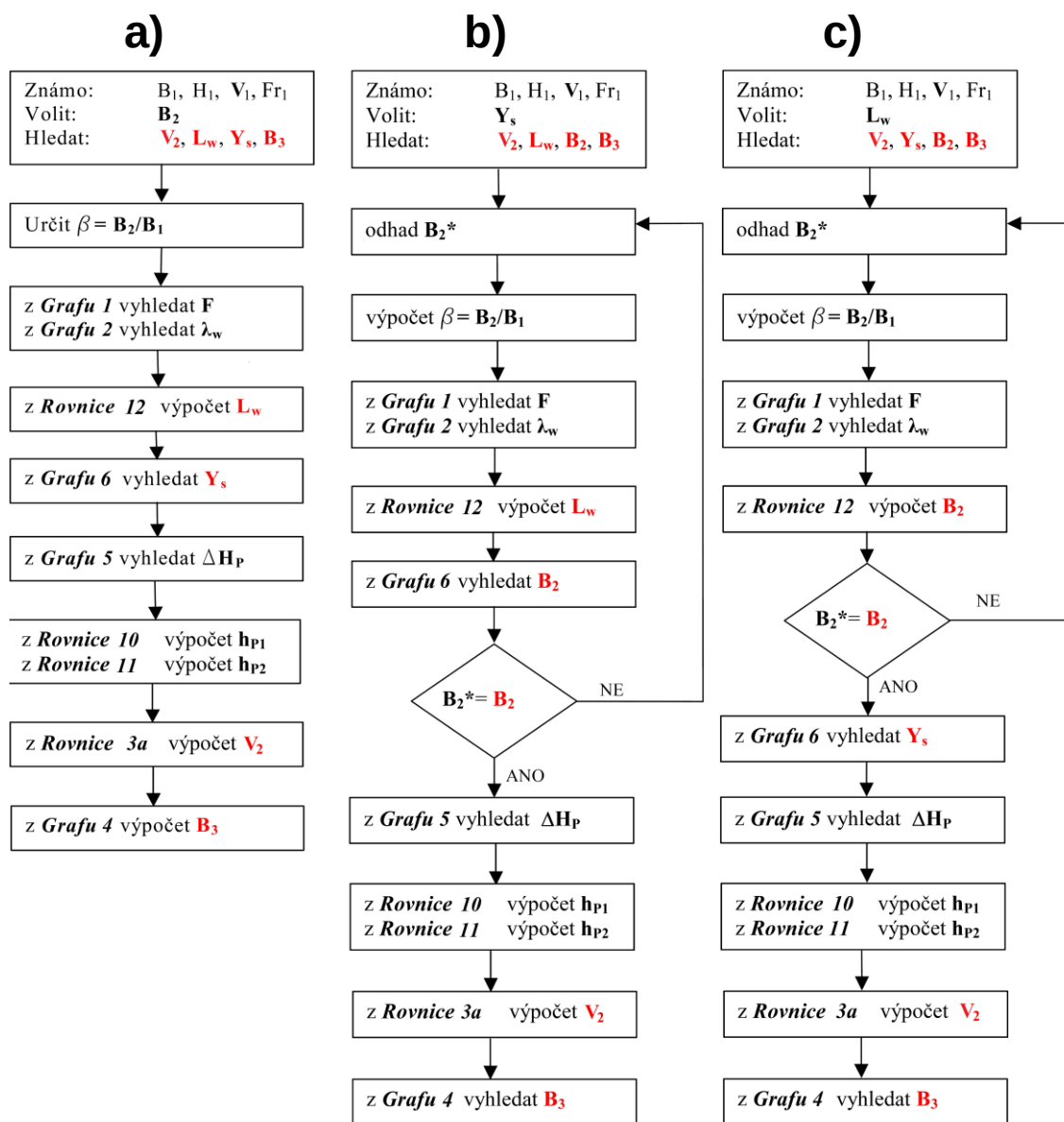
Obr. 5. Parametrický vývoj tvaru výmolu – tvar výmolu pro jakýkoli časový okamžik t je afinní ke tvaru v jiném časovém okamžiku $t + 1$

Fig. 5. Parametric scour hole development – the scour hole shape for any time instant t is affine to the shape at another time instant $t + 1$

Návrhová metodika prostorového výmolu

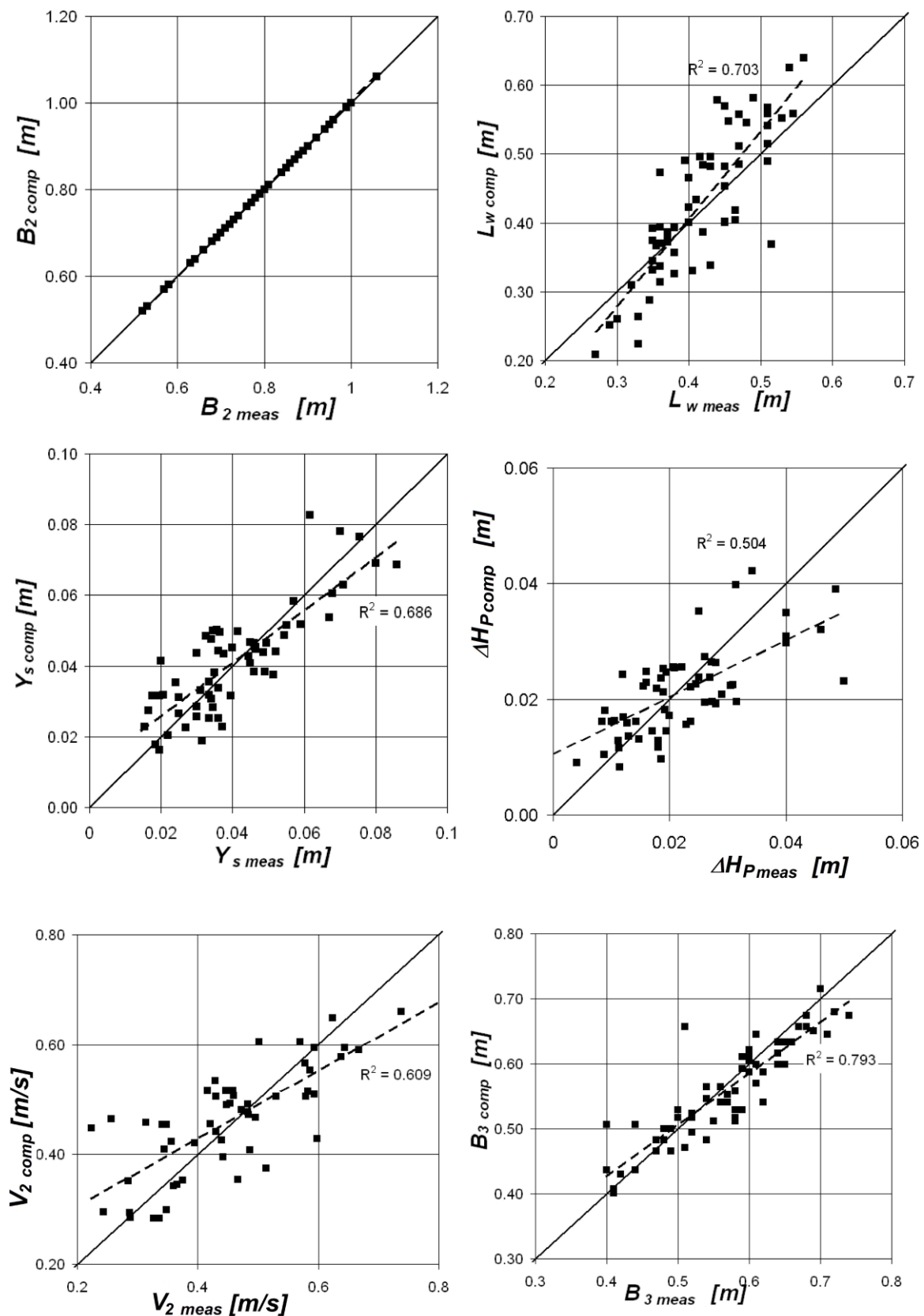
Schéma postupu stanovení základních rozměrů výmolové prohlubně v přechodové oblasti rozvolněného koryta vychází z grafického znázornění na obr. 6. Pro vstupní tvarově fixovaný profil 1 opevněného koryta jsou známy charakteristiky proudu – hloubka H_1 , rychlost V_1 , hodnota Froudova čísla Fr_1 a šířka proudu B_1 odpovídající výchozí šířce koryta v přechodové oblasti rozvolněného koryta. Návrh výmolové prohlubně jako prostorového morfologického prvku spočívá v určení jeho základních geometrických rozměrů B_2 , L_w , Y_s , B_3 a stanovení snížené průřezové rychlosti V_2 v rozšířeném profilu 2 (obr. 3). Postup stanovení základních veličin výmolu se u alternativy a), b) nebo c) na obr. 6 liší podle toho, zda je výchozím známým nebo zadaným rozměrem výmolové prohlubně její maximální šířka B_2 , hloubka Y_s , nebo délka L_w . Ve všech alternativách výpočtu je třeba nejdříve určit poměr rozšíření koryta $\beta = B_2/B_1$ – pokud B_2 není známo nebo zadáno, je třeba jej odhadnout. Dále je třeba dle grafu 1 nebo ze vztahu (rov. 4) stanovit parametr energetické přeměny F v závislosti na β a hodnotě Fr_1 a dle grafu 2 nebo ze vztahu (rov. 5) bezrozměrnou délku úplavu λ_w , jež spojuje základní půdorysné rozměry výmolové prohlubně L_w , B_1 a B_2 prostřednictvím vztahu (rov. 12). Pokud B_2 nebylo známo na počátku výpočtu a bylo nutné ho volit,

lze jeho správnou volbu ověřit právě vztahem (rov. 12), popř. i *grafem* 6, resp. vztahem (rov. 9), který spojuje geomechanické vlastnosti nesoudržného materiálu v rozvolnění koryta a všechny základní geometrické rozměry výmolové prohlubně. Pokud je docíleno dostatečné shody odhadu B_2 s jeho hodnotou určenou výpočtem, lze postupovat dále stanovením šířky koryta na konci výmolové prohlubně B_3 dle *grafu* 4, resp. pomocí vztahu (rov. 7). Pokud je třeba stanovit průřezovou rychlost V_2 v profilu 2 (např. pro posouzení kritické nevymílací rychlosti částic dna), stanoví se nejdříve snížení hladiny ve výmolu ΔH_p dle *grafu* 5, resp. vztahem (rov. 8) a následně se využijí vazební vztahy (rov. 10) a (rov. 11) ke stanovení polohových výšek h_{p1} a h_{p2} . Poté již lze použít definiční vztah (rov. 3a) pro stanovení průřezové rychlosti V_2 v profilu 2 ve výmolu.



Obr. 6. Schéma postupu stanovení prostorové výmolové prohlubně, kdy jeden z rozměrů je zvolen: a) B_2 je zvolen; b) Y_s je zvolen; c) L_w je zvolen. Odkazované grafy jsou uvedeny v obr. 4, čísla rovnic odpovídají textu
 Fig. 6. Charts of design procedure of the scour hole dimensions which one is chosen: a) B_2 is given; b) Y_s is given; c) L_w is given. The referenced graphs are shown in fig. 4, the numbers of the referenced formulas correspond to the text

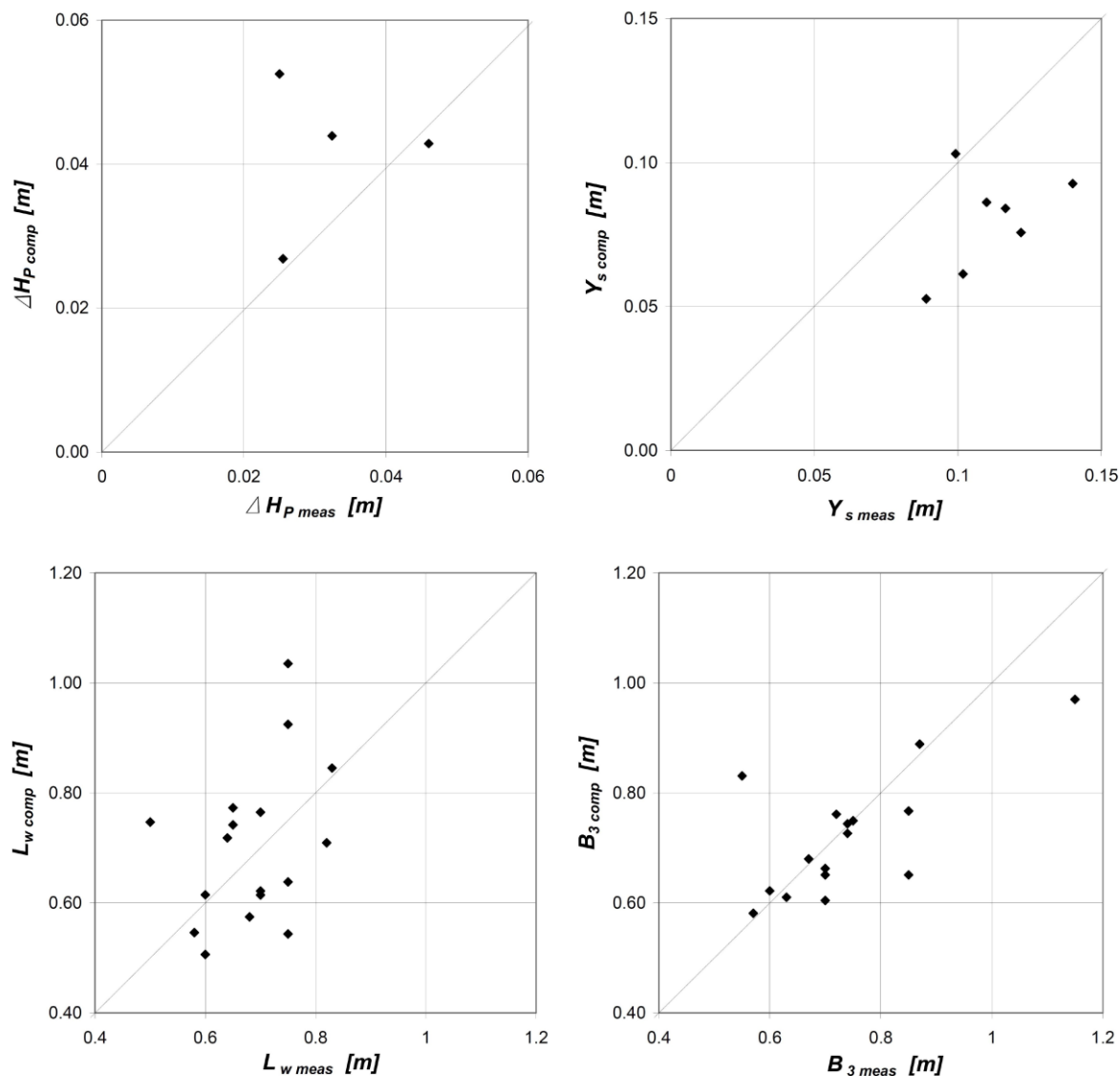
Soustava empirických rovnic (4–9) společně s rovnicemi výškových vztahů (10, 11) a definičními vztahy (3a) a (12) tvoří systém k plnému řešení prostorového výmolu tvaru „hrušky“. Vzájemně provázaná aplikace jednotlivých vztahů při výpočtu výmolu, tvořící ucelený postup, je chápána jako metodika návrhu výmolu typu „hrušky“. Každá z empirických rovnic však byla statisticky upřesněna pouze individuálně. Je tedy nezbytné prověřit, jaké míry shody s měřenými daty lze docílit při aplikaci celého systému navržených vztahů – návrhové metodiky. Nejedná se zde o verifikaci na nezávislém souboru dat. Jde pouze o prověření, jak „přiléhavá“ je celá metodika výpočtu výmolu v porovnání s měřenými daty, z nichž byl každý z použitých empirických vztahů individuálně odvozen. Při návrhu výmolu typu „hrušky“ musí být vždy jeden z rozměrů výmolu volen, čímž je do návrhu parametrického výmolu vnesen faktor času. Podle toho, který z rozměrů je volen, musí být metodický postup mírně upraven – jsou použity stejné vztahy, ale v jiném pořadí. Schémata postupu řešení pro případ, že jsou voleny rozměry a) B_2 , b) Y_s , nebo c) L_w , jsou uvedena na obr. 6.



Obr. 7. Posouzení přiléhavosti metodiky výpočtu výmolu testem shody vypočtených (*comp*) a měřených (*meas*) geometrických a hydraulických charakteristik při volbě šířky B_2

Fig. 7. Assessment of the scour hole computation procedure suitability by testing the agreement between calculated (*comp*) and measured (*meas*) geometric and hydraulic characteristics when selecting the width B_2

Postup posouzení „přiléhavosti“ probíhal následovně. Vyšlo se ze známých údajů o proudění na vstupním profilu do výmolu (průřezová rychlost V_1 , hloubka H_1 a šířka proudu B_1 a z nich stanovená hodnota Fr_1) a geomechanických vlastností zeminy (d_{50} , ϕ) – tyto údaje budou většinou v praxi také známy. Byly aplikovány jednotlivé postupy řešení podle toho, který z rozměrů B_2 , Y_s nebo L_w byl volen jako výchozí pro výpočet. Výsledkem byly vypočtené veličiny B_2 , L_w , Y_s , ΔH_P , V_2 , B_3 (označené indexem *comp* = *computed*). Ty byly porovnány pomocí testu shody s veličinami změřenými v polovičním modelu koryta (označené indexem *meas* = *measured*). Výsledky testu shody pro výpočet při zvoleném rozměru B_2 ukazuje obr. 7. První graf sady ukazuje naprostou shodu, neboť zaměřená data byla použita zároveň i jako výchozí rozměr ve výpočtu. Provedené testy shody pro další volené výchozí rozměry výmolvé prohlubně Y_s a L_w (není zobrazeno) umožňuje učinit závěr, že výpočetní metodika výmolu je „nejpřiléhavější“, pokud je jako výchozí volený rozměr pro výpočet použita právě šířka výmolu B_2 .



Obr. 8. Verifikace výpočetní metodiky návrhu výmolu typu „hrušky“ (při voleném B_2) testem shody s daty zjištěnými na „plném“ prostorovém modelu
 Fig. 8. Verification of the “pear shaped” scour hole computation methodology (when B_2 is given) by a test of agreement with the data measured in the “full” spatial model

Mimo posouzení „přiléhavosti“ u navržené výpočetní metodiky byla také provedena její verifikace se skupinou nezávislých dat, jež byla získána na „úplném“ prostorovém modelu. Ze sady 23 experimentů na prostorovém modelu bylo možné vyhodnotit jen některé posuzované veličiny s četností hodnot v souboru v rozmezí 4–17. Toto

porovnání mezi výpočetní metodikou odvozenou na „polovičním“ modelu a daty zjištěnými v „úplném“ prostorovém modelu je jistě užitečné (obr. 8). Lze zde stanovit, jak významně se promítne zjednodušující předpoklad symetrie proudění ve výmolu do správnosti výpočetní metodiky odvozené za zjednodušených předpokladů.

Dat pro porovnání je málo. Ta, která byla k dispozici, ukazují, že zjednodušující předpoklad symetrie skutečně má určitý dopad na přesnost navržené metodiky výpočtu výmolu typu „hrušky“ při její aplikaci na plně prostorový případ vymílání. Lze se však domnívat, že ovlivnění správnosti výpočetní metodiky z důvodu předpokladu symetrie proudění nepřesahuje vliv jiných faktorů, včetně chyb při měření. Např. svislicové rychlosti určené v „polovičním“ modelu byly měřeny zjednodušeným způsobem a skleněná stěna v ose proudu zřejmě mírně ovlivňovala tvar hladiny i dna v její blízkosti. Naopak u „plného“ modelu docházelo k méně přesnému a časově nepohotovému zaměřování dna a hladiny hrotovým měřítkem. Při zvážení všech uvedených vlivů zahrnutých v rámci chyb a zkreslení při zvoleném postupu experimentálních prací se lze domnívat, že předložená výpočetní metodika má reálné jádro a mohla by být přínosem v oblasti návrhu morfologických objektů při revitalizačních úpravách na vodních tocích.

ZÁVĚR

Výše uvedený postup pro navrhování prostorové výmolové prohlubně v rozvolnění toku lze využít při návrhu přírodě blízkých koryt malých vodních toků nebo v procesu zpřirodňování v minulosti necitlivě kanalizovaných koryt drobných vodotečí v podhorských oblastech. Konstruování předem vytvořených morfologických objektů ve formě cíleného rozvolnění koryta, které podporují vznik prostorového proudění a disipaci přebytku kinetické energie, může být užitečným a nákladově efektivním opatřením v prevenci proti destruktivní erozi povodňového průtoku v korytě a zároveň může vést ke zvýšení morfologické, a tedy i habitatové rozmanitosti uvnitř koryta vodního toku.

Nicméně, přijetí těchto opatření v rámci procesu revitalizačních úprav koryta vodního toku musí být vždy řádně posouzeno příslušným vodoprávním úřadem z hlediska změny stavu i užívání vlastního koryta a území v okolí vodního toku, kdy se např. opevněný meliorovaný odvodňovací kanál změní na tvarově rozvolněný mělký luční potok a okolní odvodněná zemědělsky využívaná plocha se přemění na občasné zatápné louky.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu podpořeného Technologickou agenturou ČR SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“.

Literatura

- [1] ASHIDA, K. On River Bed Variations and Stable Channels in Alluvial Streams. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*. 1964, 14, s. 23–45.
- [2] BREUSERS, H. N. C. Scour bellow Low Head Structures. In: BREUSERS, H. N. C., RAUDKIVI, A. J. *Scouring. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 2*. Rotterdam / Brook-field: Balkema, 1991, s. 123–142. ISBN 978-9061919834.
- [3] HRAZDÍLEK, I. *Etapa č. 02. Výskum transformácie prizmatických koryt ako súčasť ich revitalizácie a výskum vzájomného ovplyvňovania prúdenia v inundácii a v koryte*. Bratislava: VÚVH, 1999, 138 s.
- [4] HUNZINGER, L. *Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung*. Zürich: VAW, 1998, 206 s. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 159.

[5] SKLENÁŘ, P., WRIGHT, C. Scour Formation and Dissipation of Kinetic Flow Energy in a Channel with Loose Boundary and Small Width/Depth Ratio. In: *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics – River Flow*. Vol. 2. A. A. Balkema Publisher, 2002, s. 1 117–1 125. ISBN 978-9058095169.

[6] SKLENÁŘ, P. *Hydraulické a morfologické účinky proudění v korytech malých vodních toků s revitalizačními úpravami. Doktorská disertační práce*. Praha: Fakulta stavební ČVUT, 2004.

[7] ZARN, B. Stabilising a Riverbed by Local Widening — A Case Study of the River Emme, Switzerland. In: *Sediment Transport Mechanisms in Coastal Environments and Rivers. Proceedings of the EUROMECH 310 Conference, Le Havre, France, 13–17 September 1993*, s. 388–396. World Scientific Publication, 1994. ISBN 978-9810218546.

Autor

Ing. Petr Sklenář, Ph.D.^{1,2}

petr.sklenar@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-4591-3148

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

²Fakulta stavební ČVUT, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2023.07.002

STUDY OF STREAM MORPHOLOGICAL CHANGES AND ITS APPLICATION IN THE DESIGN OF ENVIRONMENTALLY ACCEPTABLE CHANNELS

SKLENÁŘ, P.^{1,2}

¹T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

²CTU – Faculty of Civil Engineering, Prague

Keywords: open channel flow – 3D scour – bed and bank erosion – fluvial processes – energy dissipation – design of channel renaturation

Climatic changes are manifested in a number of places by significantly spatially localized torrential rainfalls with a short duration but with a high intensity. One of the expected consequences of this type of precipitation is the occurrence of flash floods with devastating effects of enormous morphological changes in the channels of small or medium sub-mountainous streams. This paper summarizes research on the initiation and development of a scour hole at transition from fixed to loose channel boundary. The main attention in this research was paid to development of a new method of the spatial stabilization of the channel “parametric morphological scour”, using their shape modifications without application of any engineered methods of revetment, enabling successive natural channel changes. The insights from this model can be used both for understanding the hydraulic-morphological

processes that occur at the site of sudden channel transition, and for practical design of channel renaturation at conditions of transition from fixed to loose channel boundary.

Accepted for print