

# **KANÁLOVÉ VODNÉ ELEKTRÁRNE – HYDRAULICKÝ VÝSKUM PREVÁDZKY DERIVAČNÝCH KANÁLOV**

**ZÁKLADNÝ HYDRAULICKÝ VÝSKUM**

**Peter Dušička  
Radomil Květon**

**STU**  
SLOVENSKÁ TECHNICKÁ  
UNIVERZITA V BRATISLAVE

# **KANÁLOVÉ VODNÉ ELEKTRÁRNE – HYDRAULICKÝ VÝSKUM PREVÁDZKY DERIVAČNÝCH KANÁLOV**

**ZÁKLADNÝ HYDRAULICKÝ VÝSKUM**

**Peter Dušička  
Radomil Květon**

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
2015**

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu nesmie byť použitá na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo nakladateľstva.

© prof. Ing. Peter Dušička, PhD., doc. Ing. Radomil Květon, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Jozef Kamenský, PhD.  
prof. Ing. Tomáš Hodák, PhD.

Prof. Ing. Peter Dušička, PhD., doc. Ing. Radomil Květon, PhD.

**KANÁLOVÉ VODNÉ ELEKTRÁRNE – HYDRAULICKÝ VÝSKUM  
PREVÁDZKY DERIVAČNÝCH KANÁLOV  
Základný hydraulický výskum**

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladateľstve STU, Bratislava,  
Vazovova 5, v roku 2015.

Edícia monografií

Rozsah 92 strán, 47 obrázkov, 5 tabuliek, 5,888 AH, 6,054 VH, 1. vydanie,  
edičné číslo 5832, vydané v elektronickej forme;  
umiestnenie na <http://www.svf.stuba.sk>

Schválila Edičná rada Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

85 – 207 – 2015

ISBN 978-80-227-4326-6



## OBSAH

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV .....	7
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK .....	9
1 ÚVOD .....	11
2 SKUPINY KANÁLOVÝCH VE – HYDRAULICKÉ VÄZBY A FUNKCIE .....	12
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY KANÁLOVÝCH VE .....	12
2.2 VÄZSKA KASKÁDA .....	13
2.3 HYDRAULICKÉ VÄZBY KANÁLOVÝCH VE .....	15
2.4 FUNKCIE KANÁLOVÝCH VE PRE ELEKTRIZAČNÚ SÚSTAVU .....	16
3 PRÚDENIE VODY V DERIVAČNOM KANÁLI – HYDRODYNAMICKÝ MODEL .....	18
3.1 CHARAKTER PRÚDENIA VODY V DERIVAČNOM KANÁLI .....	18
3.2 HYDRODYNAMICKÝ MODEL KANÁLOVÝCH VE VÄZSKEJ KASKÁDY .....	22
3.3 MOŽNOSTI VYUŽITIA HYDRODYNAMICKÉHO MODELU KANÁLOVÝCH VE VÄZSKEJ KASKÁDY ..	23
3.4 METODIKA OVEROVANIA SÚČiniteĽA DRSNOSTI DERIVAČNÝCH KANÁLOV .....	24
3.4.1 Meranie súčiniteĽa drsnosti pri ustálenom stave .....	25
3.4.2 Meranie súčiniteĽa drsnosti pri neustálenom stave .....	27
3.5 MOŽNOSTI VYUŽITIA MATEMATICKÉHO MODELOVANIA PRÚDENIA VODY PRI RIADENÍ PREVÁDZKY KANÁLOVÝCH VODNÝCH ELEKTRÁRNÍ .....	28
4 ANALÝZA PREVÁDZKY SKUPÍN KANÁLOVÝCH VE .....	53
5 FAKTORY ZVYŠUJÚCE ENERGETICKÉ STRATY NA DERIVAČNÝCH KANÁLOCH .....	63
5.1 PRÍČINY VZNIKU LOKÁLNYCH ENERGETICKÝCH STRÁT NA DERIVAČNÝCH KANÁLOCH .....	63
5.1.1 Skupina derivačných kanálov Dolné Kočkovce – Ladce – Ilava – Trenčín .....	63
5.2 PRÍČINY VZNIKU POZDĽŽNYCH ENERGETICKÝCH STRÁT NA DERIVAČNÝCH KANÁLOCH .....	67
6 PRÍKLAD APLIKÁCIE VÝSLEDKOV HYDRAULICKÉHO VÝSKUMU KANÁLOVÝCH VE VÄZSKEJ KASKÁDY .....	70
6.1 VS KRPEĽANY – SUČANY – LIPOVEC .....	70
6.1.1 Účel VS .....	70
6.1.3 Údaje o derivačnom kanáli skupiny VE Krpeľany – Sučany – Lipovec .....	72
6.2 STANOVENIE HYDRAULICKEJ CHARAKTERISTIKY – STUPŇA DRSNOSTI OMOČENÉHO OBVODU ..	72
6.3 SKUPINA VE KRPEĽANY – SUČANY – LIPOVEC .....	73
6.3.1 Úsek Krpeľany – Sučany .....	75
6.3.2 Úsek Sučany – Lipovec .....	76
6.3.3 Úsek Lipovec odpadový kanál .....	77
7 ZÁVER .....	78
8 LITERATÚRA .....	80
9 GRAFICKÉ PRÍLOHY .....	83

SÚHRN .....	87
SUMMARY .....	89
ŽIVOTOPISY AUTOROV .....	91

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

$A$	–	prietočná plocha koryta	$[\text{m}^2]$
$a$	–	empirický koeficient	$[-]$
$C$	–	Chézzyho rýchlostný súčiniteľ	$[\text{m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c$	–	koeficient strát v dôsledku kontrakcie alebo expanzie toku	$[-]$
$g$	–	gravitačné zrýchlenie	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
$H$	–	hĺbka vody, hĺbka vody v profile	$[\text{m}]$
$H_C$	–	čistý spád vody na VE	$[\text{m}]$
$h$	–	hĺbka vody v profile, charakteristická hĺbka riečného profilu	$[\text{m}]$
$i_0$	–	pozdĺžny sklon dna	$[-]$
$i_e$	–	sklon čiary energie	$[-]$
$K$	–	modul prietoku	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$l$	–	dĺžka úseku medzi profilmi	$[\text{m}]$
$n$	–	Manningov koeficient drsnosti dna	$[-]$
$P_a$	–	atmosférický tlak	$[\text{Pa}]$
$P$	–	elektrický výkon	$[\text{kW}]$
$\bar{P}_w$	–	stredná hodnota omočeného obvodu	$[\text{m}]$
$Q$	–	prietok vody v koryte	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$Q_{odt}$	–	odtok z nádrže	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$Q_{pri}$	–	prítok do nádrže	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$Q_T$	–	turbínový prietok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$q_l$	–	hustota bočného prítoku/odtoku do/z koryta	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$R$	–	hydraulický polomer	$[\text{m}]$
$T$	–	šírka koryta v hladine	$[\text{m}]$
$t$	–	čas, modelový čas	$[\text{s}]$
$U$	–	stredná profilová rýchlosť v smere x	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$V$	–	objem systému, objem vody v nádrži	$[\text{m}^3]$
$V$	–	priemerná profilová rýchlosť vody	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_l$	–	zložka rýchlosti bočného prítoku v smere osi x	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v$	–	lokálna rýchlosť	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$W, W_f$	–	rýchlosť vetra	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$x$	–	vzdialenosť pozdĺž dna modelovaného kanála v smere po toku	$[\text{m}]$

$y$	–	hĺbka vody v profile	[m]
$z, z_d$	–	kóta dna	[m]

### grécke symboly

$\alpha$	–	Coriolisov koeficient	[–]
$\beta$	–	Boussinesquovo číslo	[–]
$\beta'$	–	koeficient vyjadrujúci nerovnomerné rozdelenie rýchlosti po zvislici	[–]
$\Delta t$	–	časový krok, použitý pri diskretizácii rovníc	[s]
$\Delta y$	–	zmena polohy hladiny medzi dolným a horným profilom	[m]
$\xi$	–	koeficient zmeny kinetickej energie	[m <sup>-1</sup> s <sup>2</sup> ]
$\eta$	–	celková účinnosť premeny energie	[–]
$\theta$	–	váhový koeficient medzi implicitnou a explicitnou schémou	[–]
$\mu^D$	–	súčiniteľ dynamickej viskozity	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	–	hustota (merná hmotnosť) kvapaliny	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\Omega$	–	povrch systému	[m <sup>2</sup> ]



## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

APVT	–	Agentúra pre vedu a techniku
APVV	–	Agentúra pre výskum a vývoj
HDM	–	hydrodynamický model
MM	–	matematický model, matematické modelovanie
NNP	–	neustálené nerovnomerné prúdenie
SvF STU	–	Stavebná fakulta STU v Bratislave
UNP	–	ustálené nerovnomerné prúdenie
VD	–	vodné dielo
VE	–	vodná elektráreň
VN	–	vodná nádrž
VS	–	vodohospodárska stavba
1D	–	jednorozmerný
2D	–	dvojrozmerný



# 1 ÚVOD

Kanálové vodné elektrárne sú špecifickým typom vodných elektrární. Možnosti ich prevádzky a stupeň účinnosti premeny celkového hydroenergetického potenciálu z veľkej miery závisí od konštrukčného vyhotovenia derivačného kanála a jeho momentálneho stavu – najmä kvality povrchu jeho omočeného obvodu, ktorá je charakterizovaná parametrom drsnosti.

Čo do počtu tak i do celkového inštalovaného výkonu majú kanálové vodné elektrárne v rámci vodných elektrární na Slovensku významný podiel. Platí to v plnej miere aj o vodných elektrárnach na Vážskej kaskáde.

K možnostiam, ako sa dá navrhnuť zefektívnenie prevádzky kanálových vodných elektrární, patrí aj výskum prúdenia vody v derivačných kanáloch pri rôznych režimoch prevádzky. Na základe výsledkov výskumu sa dajú navrhnuť opatrenia pre bezpečnú prevádzku respektíve pre možné úpravy derivačných kanálov smerujúce napríklad ku zníženiu hydraulických strát.

Pre potreby výskumu prevádzky kanálových vodných elektrární na Vážskej kaskáde bol na Katedre hydrotechniky SvF STU vyvinutý hydrodynamický model prúdenia vody v derivačných kanáloch. Tento model bol pre potreby ďalšieho použitia kalibrovaný a verifikovaný na základe niekoľkých meraní „in situ“ – t. j. meraní hladinového režimu priamo v teréne pri rôznych spôsoboch prevádzky kanálových vodných elektrární. Dôležitou hydraulickou charakteristikou derivačných kanálov zisťovanou pri terénnom výskume bol drsnostný súčiniteľ kanálov. Kalibrovaný a verifikovaný hydrodynamický model možno použiť pre ďalšie výpočty prúdenia vody v súvislosti s výskumom regulačnej prevádzky kanálových vodných elektrární napríklad pre zabezpečovanie podporných služieb pre elektrizačnú sústavu alebo aj pre riešenie interakcie regulačnej energetickej prevádzky a pripravovanej plavebnej prevádzky na jednotlivých stupňoch Vážskej kaskády.

Základ pre vznik tejto práce boli poznatky z výskumných projektov vykonávaných Katedrou hydrotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave najmä v období rokov 1998 – 2010, ktorých predmetom bol výskum prevádzky kanálových vodných elektrární.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV–0680–10.

## 2 SKUPINY KANÁLOVÝCH VE – HYDRAULICKÉ VÄZBY A FUNKCIE

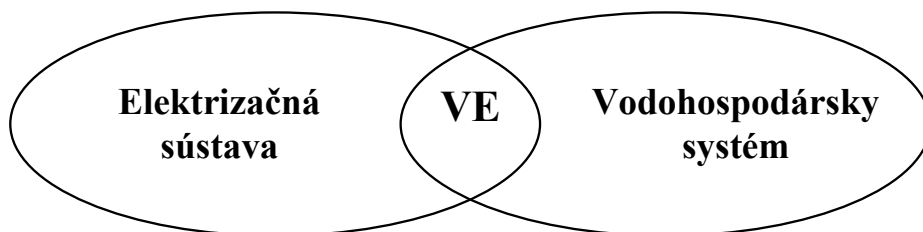
### 2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY KANÁLOVÝCH VE

Vodná elektráreň (VE) je uzlový bod, kde sa stretajú dva na sebe nezávisle fungujúce systémy:

1. *elektrizačná sústava* (a jej potreby), do ktorej VE dodáva elektrickú energiu
- a
2. *vodohospodársky systém*, daný hydrologickými a hydraulickými pomermi v povodí vodného toku a v sústave derivačných energetických kanálov.

Každý z týchto systémov má iné zákonitosti správania sa v reálnom čase. Pre správne a bezproblémové fungovanie VE je preto potrebné poznať správanie sa oboch systémov.

Postavenie VE medzi elektrizačnou sústavou a vodohospodárskym systémom je znázornené na obr. 2.1.



Obr. 2.1. Postavenie VE medzi elektrizačnou sústavou a vodohospodárskym systémom

Jedna z dôležitých častí vodohospodárskeho systému je *hydraulický systém*, ktorý zabezpečuje pre VE prívod a odtok vody. Hydraulický systém má priamy vplyv na veľkosť hydraulických strát. Tým priamo podmieňuje možnosti využívania potenciálu vody a efektívnosť výroby elektrickej energie vo VE.

Nositeľka primárnej energie je v prípade VE voda. Z vodohospodárskeho hľadiska je preto kľúčom ku správne návrhu VE a neskôr k jej bezproblémovej a bezpečnej prevádzke správny návrh vodohospodársko-energetického plánu VE. Tento plán zosúladzuje vodnosť toku resp. prietokové pomery v toku (hydrológiu) a hydraulické vlastnosti systému (napr. straty energie

z titulu hydraulických strát) na jednej strane a s potrebami elektrizačnej sústavy, do ktorej VE dodáva energiu, na druhej strane.

Na riešenie vodohospodársko-energetických plánov VE sa používajú dve základné metódy – objemová a hydrodynamická. Je možná aj ich kombinácia (t. j. objemovo-hydrodynamická). Metóda objemová je vhodná tam, kde nedochádza pri prúdení vody k významným deformáciám hladiny a možno ich zanedbať. Je to najmä v prípade údolných nádrží resp. zdrží.

V prípadoch, keď dochádza pri prúdení vody k významným deformáciám hladiny a nie je možné ich v žiadnom prípade zanedbať, je nutné používať na riešenie hydrodynamické metódy. Ide najmä o riešenie hladinového režimu v derivačných kanáloch. Zvlášť veľké deformácie hladiny vznikajú pri extrémnych prípadoch prevádzky, keď VE plní napr. funkciu poruchovej rezervy a je potrebný čo najrýchlejší nábeh do prevádzky na plnú kapacitu.

## 2.2 VÁŽSKA KASKÁDA

Váh je najvýznamnejšia a po Dunaji najväčšia rieka na Slovensku. Pramení v horskej oblasti medzi dvoma pohoriami – Vysokými a Nízkymi Tatrami. Vzniká sútokom Bieleho a Čierneho Váhu nad obcou Kráľova Lehota. Na svojej 367 km dlhej ceste priberá veľa prítokov a prekonáva výškový rozdiel 556 m. Povodie Váhu zaberá plochu 16 969 km<sup>2</sup>, čo je 34 % plochy územia Slovenska. Z hydroenergetického hľadiska predstavuje Váh významný zdroj obnoviteľnej energie. Z celkového primárneho technicky využiteľného hydroenergetického potenciálu Slovenska 7 361 GWh predstavuje rieka Váh 3505 GWh, čo je 47,6 %.

V minulosti Váh často menil svoje koryto. Toto spôsobovalo obyvateľstvu veľké problémy, pretože údolie Váhu je pomerne úzke a oddávna pomerne husto osídlené. Kľúčom k ovládaniu prítokov vo Váhu a ku zvládnutiu povodní sa stali dve veľké vodné nádrže s možnosťou dlhodobej regulácie prítokov – vodná nádrž Liptovská Mara vo vrcholovej časti Váhu a vodná nádrž Orava vo vrcholovej časti rieky Orava, ktorá je najväčším prítokom Váhu. Tieto dve vodné nádrže držia na slovenské pomery dve prvenstvá. Vodná nádrž Liptovská Mara má najväčší celkový objem – 360 mil. m<sup>3</sup> a vodná nádrž Orava má najväčšiu zatopenú plochu – 35 km<sup>2</sup>.

Pri oboch nádržiach sú vybudované špičkové VE, ktoré zaisťujú využitie vody z nádrží na výrobu elektrickej energie. Pod nimi sa nachádzajú vyrovnávacie nádrže s prietochnými VE. V prípade Liptovskej Mary je to Bešeňová a v prípade Oravy Tvrdošín. Takáto hydroenergetická schéma zaisťuje okrem zvládnutia povodní aj nadlepšovanie prítokov v údolí Váhu na nižšie ležiacich VE, čo má veľký význam pre zvyšovanie výroby elektrickej energie na týchto VE

(najmä v zimnom období, keď sú spravidla menšie prirodzené prietoky, ale väčší dopyt po elektrickej energii a po regulačných funkciách VE).

Husté osídlenie, významný priemysel a rozvinuté poľnohospodárstvo sa stali do istej miery obmedzujúcim činiteľom vo využívaní vodnej energie Váhu. Nebolo možné zatápať relatívne veľké oblasti, ako by to bolo v prípade výstavby údolných nádrží. Preto je využívanie vodnej energie na Váhu riešené prevažne sústavou VE na derivačných kanáloch. Celý komplex VE a vodných diel na Váhu potom vytvára Vážsku kaskádu.

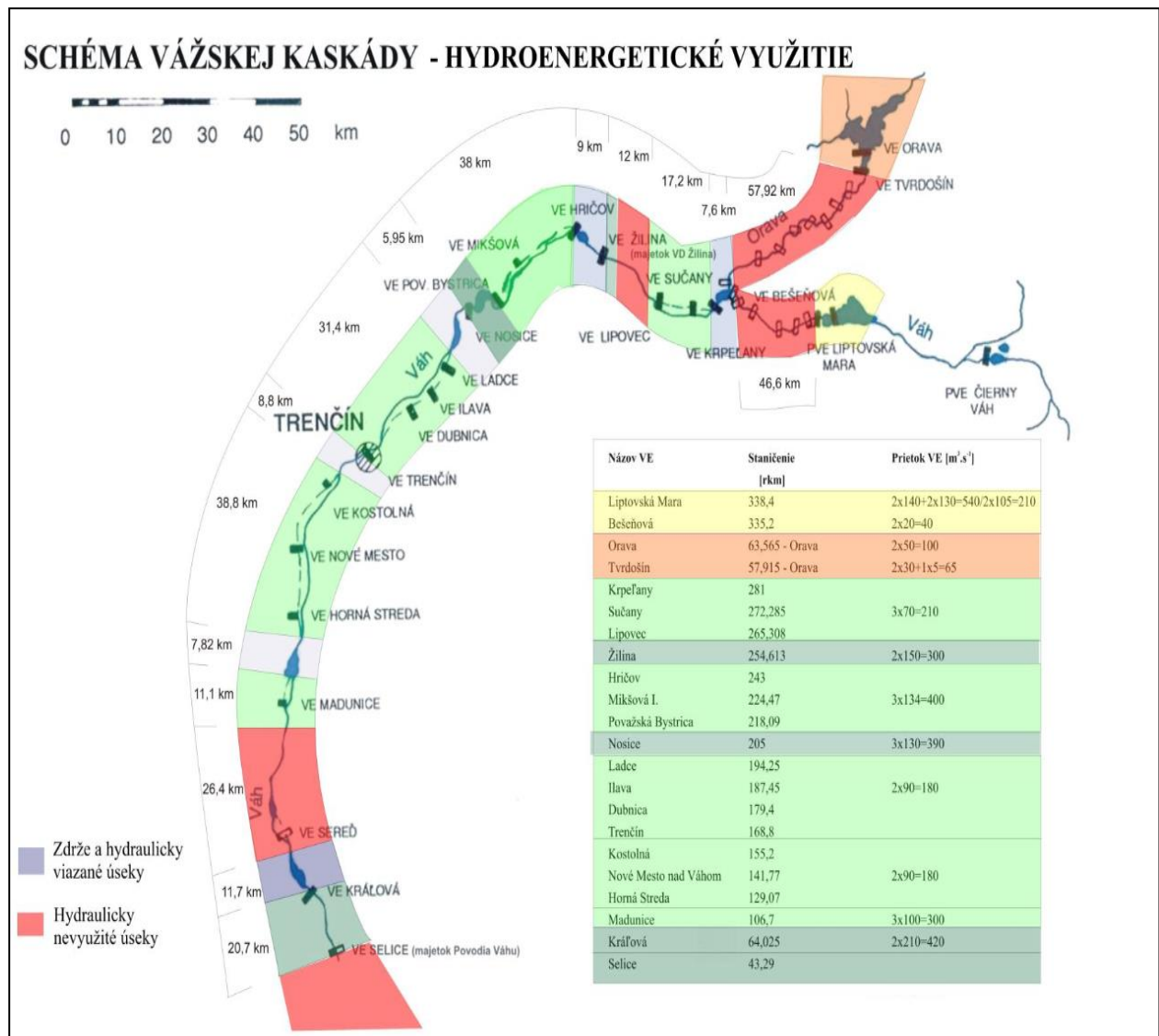
V roku 1936 bola uvedená do prevádzky prvá VE na derivačnom kanáli – VE Ladce. VE a derivačné kanály, vybudované na začiatku výstavby, umožňovali svojim dimenzovaním prevažne len pološpičkovú prevádzku. Postupom rokov sa menili názory na funkcie VE a na ich postavenie v elektrizačnej sústave. Preto boli neskôr budované rozmernejšie kanály a VE s väčšou inštalovanou hľtnosťou turbín, ktoré v kombinácii s vodnými nádržami v údolí Váhu dnes umožňujú špičkovú prevádzku.

Kanálové VE čo do počtu i do celkového inštalovaného výkonu predstavujú významnú časť Vážskej kaskády. V súčasnosti tvoria štyri samostatné skupiny (skupinou kanálových VE označujeme niekoľko VE vybudovaných na spoločnom derivačnom kanáli):

1. Krpeľany – Sučany – Lipovec,
2. Hričov – Mikšová I – Považská Bystrica,
3. Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín,
4. Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda.

Pre úplnosť uvádzame, že na dolnom Váhu je vybudovaná kanálová VE Madunice. Po výstavbe pripravovaného vodného diela Sered' by mala s týmto vodným dielom vytvoriť v poradí piatu skupinu VE Vážskej kaskády Madunice – Sered'.

Výskum bol teda sústredený na kanálové VE, kde dochádza pri prúde vody k výrazným deformáciám hladiny. Tieto nie je možné v žiadnom prípade zanedbávať, pretože hydraulické straty pri prúde vody v kanáloch tvoria významnú časť straty z celkového využívaného potenciálu. Naopak je potrebné venovať týmto javom zvýšenú pozornosť. Navyše vlny, ktoré vznikajú pri špičkovej prevádzke VE, môžu pri nesprávnej manipulácii prekračovať úroveň tesnenia hrádzi derivačných kanálov. V extrémnom prípade môže dôjsť i k prešplechnutiu koruny hrádze. Toto sú však neprípustné javy, pretože voda, ktorá sa dostane cez tesnenie do stabilizačnej časti hrádze, môže spôsobiť zmenu stability hrádze, v krajnom prípade až jej deštrukciu.



Obr. 2.2. Schéma Vážskej kaskády

### 2.3 HYDRAULICKÉ VÄZBY KANÁLOVÝCH VE

Regulačné VE, medzi ktoré patria aj skupiny kanálových VE Vážskej kaskády, majú vždy k dispozícii akumuláciu nádrže (resp. zdrž), v ktorej sa akumuluje voda. Nie sú teda odkázané len na okamžitý prietok vo vodnom toku. Ten býva zvyčajne menší, ako je súčet hĺtností turbín skupiny kanálových VE. Plný výkon možno získať len odberom vody zo zásobného objemu nádrže (zdrže) nad začiatkom derivačného kanála, alebo, pokiaľ je ako v tomto prípade skupina VE súčasťou kaskády VE, aj vhodnou reguláciou vyššie ležiacich VE.

Pretože prietokový režim je v tomto prípade regulovaný, zaradíme takúto skupinu kanálových VE medzi regulačné VE. Cez profil každej VE na derivačnom kanáli preteká vždy rovnaký regulovaný prietok, ktorý VE spracúvajú súčasne alebo postupne. Celá skupina býva riadená podľa prvej VE na derivačnom kanáli. Túto VE nazývame aj riadiacou VE skupiny a prevádzku nazývame tandemovou prevádzkou.

Pri nasadení skupiny VE do tandemovej prevádzky vzniká neustálený pohyb vody v derivačnom kanáli. To isté platí aj pre odstavenie skupiny z prevádzky alebo pre zmenu prietoku počas prevádzky. Ustálený stav pohybu vody v kanáli nastáva až po dostatočne dlhej dobe prevádzky na konštantný prietok. Pri špičkovom charaktere prevádzky skupiny VE nemusí najmä pri krátkych špičkách k ustáleniu vôbec dôjsť.

Hydroenergetická schéma kanálových VE na Váhu pozostáva z troch (respektíve štyroch) VE na spoločnom derivačnom kanáli. Zhora aj zdola býva ohraničená nádržami (respektíve zdržami). Z fyzikálneho hľadiska predstavuje každá VE singulárny bod. V tomto bode možno definovať hydraulické parametre prúdenia a aj jeho časový priebeh. Pri riešení hydraulického režimu a hydraulických väzieb skupiny kanálových VE nemusíme teda riešiť celú skupinu naraz. Derivačný kanál rozčleníme na jednotlivé úseky medzi dvoma VE (medzikanály). Po rozčlenení sústavy môžeme singulárne body – VE – považovať za okrajové profily a známe časové priebehy hydraulických parametrov v týchto profiloch za okrajové podmienky riešenia režimu prúdenia v jednotlivých medzikanáloch.

Pre úplnosť uvádzame, že všeobecná hydroenergetická schéma skupiny kanálových VE môže ešte obsahovať prírodný kanál od nádrže (zdrže) po prvú VE v skupine a odpadový kanál od poslednej VE v skupine do nádrže (zdrže) pod skupinou VE. V tomto prípade vtokový aj výtokový profil celej skupiny VE predstavujú takisto singulárne body, v ktorých môžeme sústavu tiež rozdeliť. Pribudnú teda úseky (medzikanály) nádrž (zdrž) – prvá VE skupiny a posledná VE skupiny – nádrž (zdrž).

## **2.4 FUNKCIE KANÁLOVÝCH VE PRE ELEKTRIZAČNÚ SÚSTAVU**

Skupiny kanálových VE Vážskej kaskády patria medzi pružné zdroje výroby elektrickej energie. Sú nasadzované najmä na pokrývanie premenlivého zaťaženia v rámci diagramu denného zaťaženia elektrizačnej sústavy. Služby (funkcie), ktoré poskytujú tieto VE pre elektrizačnú sústavu, sa dajú rozdeliť v zásade do dvoch skupín:



1. statické služby,
2. dynamické služby.

*Statické služby* sa dajú do určitej miery dopredu plánovať. Zaraduje sa sem predovšetkým plánovaná výkonová služba a transfer energie (transfer energie prichádza do úvahy iba u prečerpávacích vodných elektrární).

*Dynamické služby* vyplývajú z neustále sa meniacich požiadaviek v elektrizačnej sústave a z nutnosti nahradzovať výrobu zo zdrojov, ktoré z rôznych príčin (najčastejšie technického charakteru) vypadnú z prevádzky. Zaraduje sa sem predovšetkým výkonová záloha, ktorá môže byť vykonávaná z kľudu, keď VE nabieha z úplného pokoja na výkon, alebo ako točivá rezerva, keď už VE je v prevádzke, ale nie na plný výkon. Ďalej sem môžeme zaradiť reguláciu frekvencie a odovzdávaného výkonu, preberanie strmých špičiek a pod.

### 3 PRÚDENIE VODY V DERIVAČNOM KANÁLI – HYDRODYNAMICKÝ MODEL

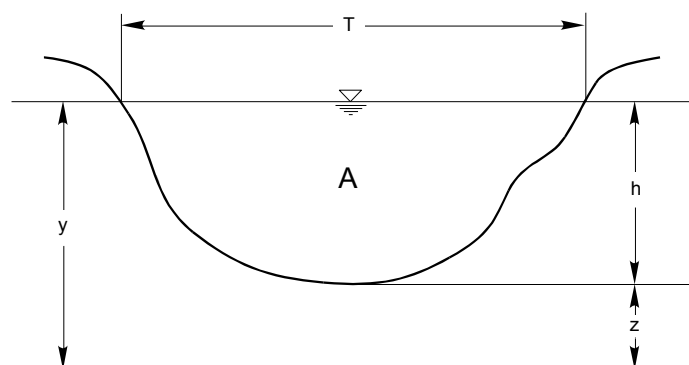
#### 3.1 CHARAKTER PRÚDENIA VODY V DERIVAČNOM KANÁLI

Z hydraulického hľadiska vzniká pri plnení funkcií pre elektrizačnú sústavu u kanálových regulačných VE spravidla *neustálený pohyb* vody v derivačnom kanáli (nasadenie skupiny VE do tandemovej prevádzky, odstavenie skupiny VE z prevádzky, zmena prietoku počas prevádzky). Ustálený stav pohybu vody v kanáli nastáva až po dostatočne dlhej dobe prevádzky na konštantný prietok, k čomu pri krátkych a výrazných špičkách nemusí vôbec dôjsť.

Naviac pri opätovnom nabíhaní VE resp. pri zmenách prietoku cez VE v čase, keď v medzi-kanáloch sú hladiny ešte silne rozvlnené, môže dôjsť k superpozícii vlnenia a ku zväčšeniu hladinových výchyliek nad obvyklé hodnoty. Tomuto javu sme vo výpočtovej časti venovali značnú pozornosť.

Postupnými zmenami prietoku v okrajových profiloch derivačných kanálov vznikajú plynulé vlny (prúdenie vody v derivačných kanáloch pri bežnej špičkovej prevádzke VE), na rozdiel od prudkých zmien, ktoré sa v hydraulickej a hydroenergetickej literatúre sa často označujú ako rázové vlny (havarijné odstavenie VE).

Neustálené prúdenie je charakterizované časovou zmenou prietokov a hladín v jednotlivých profiloch otvoreného koryta. Pri pozvoľnej zmene týchto veličín (plynulé vlny) sa dá fyzikálna podstata vyjadriť základnou sústavou parciálnych diferenciálnych rovníc Sainta–Venanta, ktoré je potrebné transformovať pre jednorozmerný (ďalej 1D) popis prúdenia vody v otvorenom koryte.



Obr. 3.1. Schéma priečného profilu

kde  $A$  je plocha prietočného profilu [ $\text{m}^2$ ],  
 $z$  – kóta dna [m],

$T$	–	šírka koryta v hladine [m],
$h$	–	hĺbka vody v profile [m],
$y$	–	kóta hladiny [m].

Rovnica kontinuity

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q_\ell = 0 \quad (3.1)$$

Dynamická rovnica

$$\frac{\partial(\beta QV)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(i_0 - i_e) + q_\ell v_\ell \quad (3.2)$$

kde	$Q$	je	prietok [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ],
	$q_\ell$	–	merný bočný prítok alebo odtok [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ],
	$x$	–	vzdialenosť profilu od počiatku ( $x = 0$ ) v smere prúdenia [m],
	$t$	–	čas [s],
	$V$	–	priemerná rýchlosť prúdenia v profile [ $\text{ms}^{-1}$ ],
	$g$	–	gravitačné zrýchlenie [ $\text{ms}^{-2}$ ],
	$\beta$	–	korekčný faktor zahŕňajúci nerovnomerné rozdelenie rýchlosti v profile,
	$i_0$	–	sklon dna,
	$i_e$	–	sklon čiary energie,
	$v_\ell$	–	zložka rýchlosti prítoku alebo odtoku v smere osi $x$ [ $\text{ms}^{-1}$ ].

Dynamická rovnica v tvare podľa vzorca (3.2) sa používa najčastejšie, ale patrí k jednoduchším tvarom tejto rovnice (MIKE 11, HECRAS). K najúplnejším tvarom patrí momentová rovnica, ktorú používa modelovací nástroj SOBEK [10]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A_f} \right) + gA_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} + gA_f \eta + \frac{g}{\rho_w} \frac{\partial \rho}{\partial x} A_{1m} = 0 \quad (3.3)$$

1.            2.            3.            4.            5.            6.            7.

Význam jednotlivých členov je nasledujúci:

1. akceleračný člen,
2. konvektívny člen,
3. gradient vodnej hladiny,
4. člen spojený s dnovým trením,
5. člen spojený s vplyvom vetra na vodnom povrchu,
6. externý doplnkový odporový člen,
7. člen spojený s pozdĺžnou zmenou hustoty prúdiacej kvapaliny.

kde je okrem bežne používanej symboliky:

$A_f$	–	plocha prietochnej časti profilu,
$h$	–	kóta vodnej hladiny (vzťahnutá na referenčnú hladinu),
$W_f$	–	rýchlosť vetra,
$\tau_{wi}$	–	povrchové napätie na hladine,
$\rho_w$	–	hustota vody,
$\eta$	–	koeficient prídavného odporu,
$A_{1m}$	–	moment 1. rádu profilu.

Prínosom rovnice (3.3) je zavedenie 6. člena. Tento umožňuje začleniť do výpočtu lokálny odporový člen, ktorý sa nedá inak popísať. Podobne umelo sa zaviedol aj pri ustálenom nerovnomernom prúdení člen popisujúci lokálne straty na energetickej výške pri prudkej kontrakcii alebo expanzii profilu.

Szymkiewicz v [9] odvodil 1D rovnice pre priemernú profilovú rýchlosť  $U$  a hĺbku vody  $H$  v tvare odvodením z 2D Saintových–Venantových rovníc integráciou po šírke toku

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \beta U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial}{\partial x}(H + z_d) + \frac{g n^2}{H^{4/3}} |U| U - \frac{a}{\rho H} |W_f| W_f + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{\mu^D}{\rho} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0 \quad (3.4)$$

1.          2.          3.          4.          5.          8.          9.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UH) = 0 \quad (3.5)$$

kde	$U$	je	priemerná profilová rýchlosť,
	$t$	–	premenná času,
	$x$	–	premenná pozdĺžnej súradnice,
	$g$	–	konštanta gravitačného zrýchlenia,
	$\beta'$	–	koeficient vyjadrujúci nerovnomerné rozdelenie rýchlosti po šírke toku,
	$H$	–	hĺbka vody v profile,
	$z_d$	–	kóta dna,
	$n$	–	Manningov súčiniteľ drsnosti omočeného obvodu profilu,
	$P_a$	–	atmosférický tlak,
	$a$	–	empirický koeficient,
	$W_f$	–	rýchlosť vetra,
	$\rho$	–	hustota vody,
	$\mu^D$	–	koeficient dynamickej turbulentnej viskozity.

V rovnici (3.4) sú oproti (3.3) navyše členy:

8. zohľadňujúci vplyv pozdĺžnej zmeny atmosférického tlaku  $P_a$ ,
9. člen reprezentujúci vplyv dynamickej turbulentnej viskozity.

Členy 5. až 9. rovníc 3.3 (prípade 3.4) sa pri zjednodušenom popise prúdenia vody v otvorenom koryte zanedbávajú a uvedené rovnice sa ďalej prepisujú z prezentácie  $U(x,t)$  a  $H(x,t)$  do prezentácie prúdenia vody pomocou prietoku vody  $Q(x,t)$  a kóty vodnej hladiny  $y(x,t)$ , ktorý je podstatne vhodnejší pre aplikáciu v technickej praxi.

Hore uvedené členy rovníc sa pre nedostatok vstupných údajov alebo ich štatistický charakter nedajú samostatne začleniť do modelu, a preto sú zahrnuté do tzv. „komplexného stupňa drsnosti omočeného obvodu kanála“ a zvyšujú stupeň drsnosti omočeného obvodu kanála, ktorý sa stanovuje zvyčajne podľa materiálovej charakteristiky povrchu kanála.

Na simuláciu neustáleného prúdenia v otvorených korytách využívame matematické modelovanie, ktoré predpokladá:

- matematickú interpretáciu fyzikálnej podstaty javu (v tomto prípade prúdenia vody v koryte),

- výber vhodnej numerickej metódy riešenia systému rovníc tak, aby riešenie bolo efektívne a stabilné,
- tvorbu matematického modelu prostredia (systému korýt), v ktorom skúmaný hydraulický jav prebieha. Model je definovaný súborom diskretných hodnôt určujúcich geometrické a hydraulické vlastnosti tohto systému v jednotlivých priečných profiloch,
- vypracovanie programu pre výpočet na počítači, nakoľko ručné riešenie je neefektívne a prakticky nemožné.

### 3.2 HYDRODYNAMICKÝ MODEL KANÁLOVÝCH VE VÁŽSKEJ KASKÁDY

Pre skupiny kanálových VE Vážskej kaskády bol vytvorený hydrodynamický model (HDM). Model slúži na výpočet ustáleného aj neustáleného prúdenia vody v derivačných kanáloch Vážskej kaskády. Hydrodynamický model bol vytvorený vo forme softvéru.

Keďže každá VE (a zároveň aj vtokový a výtokový profil celej skupiny VE) predstavujú singulárne body, kde možno definovať hydraulické parametre prúdenia a aj jeho časový priebeh (pozri kapitolu 2.3), pri riešení hydraulického režimu a hydraulických väzieb skupiny kanálových VE nie je teda potrebné riešiť celú skupinu naraz. Derivačný kanál je v modeli rozčlenený na jednotlivé úseky (medzikanály). Po rozčlenení sústavy tvoria singulárne body okrajové profily a známe časové priebehy hydraulických parametrov v týchto profiloch tvoria okrajové podmienky riešenia režimu prúdenia v jednotlivých medzikanáloch (zvyčajne pri VE je to okrajová podmienka závislosti prietoku od času a pri vtokovom a výtokovom profile celej skupiny VE je to okrajová podmienka závislosti polohy hladiny od času). Pre štart výpočtu je do modelu zavedená ešte počiatočná podmienka (zvyčajne štartovacia hladina pri nulovom prietoku alebo hydrodynamická hladina pri ustálenom prietoku).

Na tomto na základe je model rozčlenený na časti podľa jednotlivých skupín VE:

1. Krpeľany – Sučany – Lipovec,
2. Hričov – Mikšová I – Považská Bystrica,
3. Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín,
4. Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda,
5. Drahovce – Madunice.

Topológia derivačných kanálov (rozmery – technické parametre) sú v modeli prednastavené podľa údajov získaných z manipulačných poriadkov vodných stavieb Vážskej kaskády. Bližšie informácie k technickým parametrom sa nachádzajú v ďalších kapitolách. Pri prechode na numerické riešenie uvedenej sústavy rovníc metódou konečných diferencií bola na aproximáciu jednotlivých členov rovníc použitá Preissmannova implicitná schéma s váhovým koeficientom 0,67.

### **3.3 MOŽNOSTI VYUŽITIA HYDRODYNAMICKÉHO MODELU KANÁLOVÝCH VE VÁŽSKEJ KASKÁDY**

Možnosti použitia hydrodynamického modelu kanálových VE Vážskej kaskády sú najmä vo výpočtoch ustáleného a neustáleného prúdenia v medzikanáloch. Môžu mať široké a rôznorodé použitie. Oblasti použitia môžeme rozdeliť na dve základné skupiny:

1. vypracovanie zásad manipulácie so skupinou VE,
2. prevádzka.

Pod termínom „*vypracovanie zásad manipulácie so skupinou VE*“ rozumieme výpočty a ich spracovanie v štádiu predprojektovej a projektovej prípravy, resp. v štádiu skúšobnej prevádzky. Sú potrebné na technický návrh vodného diela a vypracovanie resp. dopracovanie manipulačného poriadku vodného diela. Pri týchto výpočtoch sa:

- vymedzuje rozsah prípustného kolísania hladín pri špičkovej prevádzke (respektíve v kombinácii s reguláciou frekvencie). Vymedzujú sa najmä limitné hladiny s prihliadnutím na spôsoby a rôznorodosť prevádzky skupiny VE v závislosti od potrieb elektrizačnej sústavy,
- spresňujú prevádzkové hladiny v medzikanáloch tak, aby nedochádzalo k prelievaniu tesnení kanálov (určujú sa vlnové hranice),
- posudzujú aj prípadné krátkodobé prekročenia maximálnych prevádzkových hladín respektíve až horných hrán tesnení kanálov a tento vplyv na vodné dielo (k prípadnému prekročeniu hornej hrany tesnenia kanála môže dôjsť napr. pri výrazných špičkách v oblasti maximálnych prevádzkových hladín),
- posudzuje interakcia špičkovej prevádzky s okolím, najmä vplyv na podzemné vody v okolí,

- navrhujú prevádzkové opatrenia, za akých bude celé vodné dielo spoľahlivo plniť svoju funkciu a v súvislosti s už skôr uvedeným zásady pre tvorbu, prípadne spresňovanie manipulačných poriadkov s uvažovaním vplyvu špičkovej prevádzky,
- posudzujú prípadné technické opatrenia na medzikanáloch a VE (pri starších napr. ich rekonštrukcia),
- v súvislosti s pripravovanou plavebnou prevádzkou po derivačných kanáloch možno vykonať hydraulickú analýzu plavebných podmienok, určiť rôzne obmedzenia – napr. rýchlosti, hĺbky, rázové vlny a pod.

Pod použitím v „prevádzke“ rozumieme:

- výskum superpozície vlnenia v medzikanáloch a na skupine VE ako celku. Pri regulačnej prevádzke môže totiž dôjsť ku kulminácii vln v jednotlivých medzikanáloch v závislosti od času tak, že výrazne ovplyvnia kolísanie spádu na VE a tým aj jej prevádzku,
- zostavenie a verifikáciu matematického modelu skupiny VE alebo vo všeobecnosti celého VD. Takýto model môže výrazne pomôcť dispečerovi pri riadení celej sústavy (kaskády) VE. Takisto ho možno použiť pri krátkodobom, resp. dlhodobjšom plánovaní prevádzky VE a na optimalizovanie prevádzky (napr. z titulu znižovania hydraulických strát). Modely môžu slúžiť aj pri operatívnom riadení. Pomocou nich môže dispečer efektívne prepočítavať rôzne aktuálne varianty prevádzky.

***Poznámka:***

Nakoľko možnosti použitia hydrodynamického modelu kanálových VE Vážskej kaskády sú najmä vo výpočtoch ustáleného a neustáleného prúdenia v medzikanáloch, *možno s jeho pomocou spätne určiť z meraní „in situ“ aj hydraulickú charakteristiku medzikanálov – stupeň drsnosti omočeného obvodu*. Jeho správna hodnota je pre presnosť výpočtov dôležitá. Metodika overovania súčiniteľa drsnosti derivačných kanálov je opísaná v ďalšom texte.

### **3.4 METODIKA OVEROVANIA SÚČINITEĽA DRSNOSTI DERIVAČNÝCH KANÁLOV**

Overenie súčiniteľa drsnosti omočeného obvodu derivačného kanála možno iba priamym meraním priebehov hladín v teréne pri známej prevádzke VE, a to nasledujúcimi spôsobmi:



- *Meraním pri ustálenom stave* – ustálené nerovnomerné prúdenie v kanáli musí byť dosiahnuté plynulým nábehom na požadovaný prietok cez VE – zníženie prechodových javov vlnenia v kanáli a dostatočne dlhou dobou prevádzky na konštantný prietok.
- *Meraním pri neustálenom stave* – neustálené prúdenie (používa sa iba v prípade, keď sa nedá dosiahnuť ustálený stav, nakoľko dáva menej presné výsledky).

### 3.4.1 Meranie súčiniteľa drsnosti pri ustálenom stave

Meranie súčiniteľa drsnosti pri ustálenom stave pozostáva z nasledujúcich krokov:

- Dosiahnutie ustáleného neprietočného stavu (nulový prietok) pred začiatkom meraní – ustálené hladiny v derivačných kanáloch a vyrovnávacích nádržiach sú nevyhnutné nielen pre kalibráciu meracích prístrojov, ale aj ako počiatočné podmienky pre matematické modelovanie.
- Dosiahnutie ustáleného prietočného stavu (konštantný prietok).

Podmienky pre dosiahnutie ustáleného prietočného stavu sa líšia podľa typu derivačného kanála, pričom meracie profily musia byť dostatočne vzdialené od objektov spôsobujúcich zavzdutie vody v kanáli. Frekvencia zberu údajov (meranie polohy hladiny) po 1 minúte je zvyčajne postačujúca pre väčšinu hydrodynamických javov.

Pre výpočet stupňa drsnosti meraného úseku pri ustálenom nerovnomernom prúdení sme použili metódu po úsekoch a jej zodpovedajúce vzťahy medzi hydraulickými charakteristikami:

$$\Delta y = Q^2 \left[ \xi \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) + \frac{l}{\bar{K}^2} \right]$$

$$\bar{K}^2 = \bar{A}^2 \bar{C}^2 \bar{R} \tag{3.6}$$

$$\bar{A} = (A_1 + A_2) / 2 \quad \bar{P}_w = (P_{w1} + P_{w2}) / 2 \quad \bar{R} = \bar{A} / \bar{P}_w$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \bar{R}^{1/6}$$

kde  $\Delta y$  je zmena polohy hladiny medzi dolným a horným profilom [m],  
 $Q$  – hodnota ustáleného prietoku [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],  
 $\xi$  – koeficient zmeny kinetickej energie [ $\text{m}^{-1} \text{s}^2$ ],

$A_1, A_2$	–	prietočná plocha dolného a horného profilu [m <sup>2</sup> ],
$l$	–	dĺžka úseku medzi dolným a horným profilom [m],
$\bar{K}$	–	stredná hodnota modulu prietoku [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ],
$\bar{A}$	–	stredná hodnota prietocnej plochy [m <sup>2</sup> ],
$\bar{C}$	–	Chezyho rýchlostný súčiniteľ – v Manningovom vyjadrení [m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> ],
$\bar{R}$	–	stredná hodnota hydraulického polomeru [m],
$\bar{P}_w$	–	stredná hodnota omočeného obvodu [m],
$P_{w1}, P_{w2}$	–	omočený obvod dolného a horného profilu [m],
$n$	–	Manningov drsnostný koeficient [m <sup>-1/3</sup> s].

Koeficient zmeny kinetickej energie môžeme vyjadriť v nasledujúcom tvare:

$$\xi = \frac{\alpha}{2g} \left( 1 + c \cdot \text{sign} \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \right) \quad \alpha = \frac{\int_A v^3 dA}{A \cdot \bar{v}^3} \quad (3.7)$$

kde	$\alpha$	je	koeficient vyjadrujúci nerovnomerné rozdelenie rýchlosti v profile [–],
	$c$	–	koeficient strát v dôsledku expanzie alebo kontrakcie prietocnej plochy [–],
	$v$	–	lokálna rýchlosť [m.s <sup>-1</sup> ],
	$\bar{v}$	–	stredná profilová rýchlosť [m.s <sup>-1</sup> ].

Pre našu aplikáciu rozdelíme derivačný kanál na dve časti – prívodný a odpadový kanál s uvažovaným prizmatickým tvarom. Preto pri výpočte drsnostného koeficientu uvažujeme hodnoty koeficientov  $\alpha = 1$  a  $c = 0$ .

Výsledný tvar pre výpočet Manningovho drsnostného koeficienta získame vyjadrením z rovnice (3.6):

$$n = \sqrt{\frac{\Delta y - Q^2 \xi \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right)}{l}} \frac{\bar{A}}{Q} \bar{R}^{-2/3} \quad (3.8)$$

Analýzou vzťahu (3.8) sa dá zistiť, že výsledná chyba výpočtu je daná presnosťou merania rozdielu polohy hladiny horného profilu  $z_h$  a polohy hladiny dolného profilu  $z_d$ . Vzhľadom na

limitovanú presnosť merania (zvyčajne na centimetre) a ostatné vplyvy okolia ako je zvlnenie hladiny (dané napr. vetrom), je potrebné dosiahnuť maximálny rozdiel meraných hladín, čomu zodpovedá zo vzorcov (3.6) maximálny prietok kanálom a maximálna dĺžka meraného úseku.

Ďalší dôležitý parameter ovplyvňujúci presnosť výpočtu je prietok  $Q$ , ktorý sa u VE nemeria priamo, ale prepočítava sa z elektrického výkonu a okamžitého spádu VE podľa kriviek (funkcií) stanovených pri garančných meraniach.

### 3.4.2 Meranie súčiniteľa drsnosti pri neustálenom stave

Výsledky merania súčiniteľa drsnosti pri neustálenom stave môžeme použiť iba pri nepriamom stanovení hodnoty súčiniteľa drsnosti z viacerých rôznych scenárov meraní. Na spracovanie údajov sa použije hydrodynamický model (HDM) pre modelovanie neustáleného prúdenia vody podľa schémy:

- kalibrácia HDM pre scenár s maximálnym prietokom,
- verifikácia HDM pre ostatné scenáre.

Pre riešenie problematiky napojenia prírodného kanála na nádrž (zdrž) – napr. pri VS Drahovce – Madunice – bol použitý matematický model nádrže (zdrže) založený na jej objemovej bilancii:

$$V_{t+\Delta t} = V_t + \sum Q_{pri} \cdot \Delta t - \sum Q_{odt} \cdot \Delta t \quad (3.9)$$

kde  $V$  je objem vody v nádrži (zdrži),  
 $t, \Delta t$  – čas a časový krok,  
 $Q_{pri}$  – prítok do nádrže (zdrže),  
 $Q_{odt}$  – odtok z nádrže (zdrže).

Zo známej objemovej krivky  $V = f(h)$  vieme spätným prepočtom určiť polohu hladiny zo známej hodnoty aktuálneho objemu vody v nádrži.

### 3.5 MOŽNOSTI VYUŽITIA MATEMATICKÉHO MODELOVANIA PRÚDENIA VODY PRI RIADENÍ PREVÁDZKY KANÁLOVÝCH VODNÝCH ELEKTRÁRNÍ

#### 3.5.1 Matematické modelovanie skupín vodných elektrární na Váhu

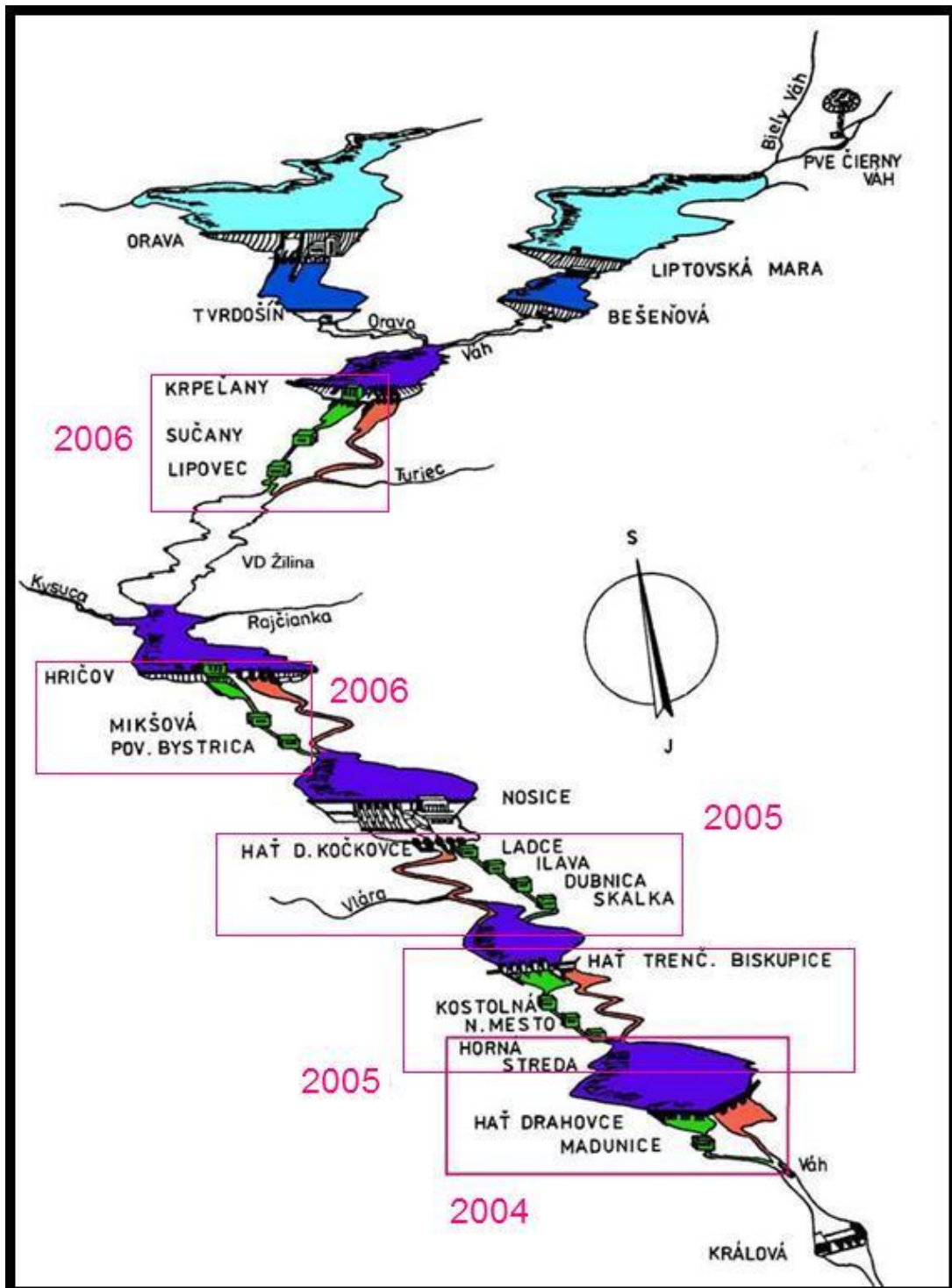
Kaskáda vodných elektrární (VE) na rieke Váh bola vybudovaná do dnešnej podoby v priebehu viac ako 60 rokov. Jednotlivé elektrárne aj celé skupiny vodných elektrární, boli navrhnuté a vybudované s rôznymi hydraulickými parametrami, ako sú rozmery derivačných kanálov, prietoky vody cez elektrárne atď. Z tohto dôvodu je hydraulická štruktúra Vážskej kaskády veľmi zložitá (obr. 3.2). Rokmi 2004 až 2006 sú označené jednotlivé etapy hydraulického výskumu na Vážskej kaskáde.

Vodné elektrárne na Váhu by sa mali využívať najmä na pokrytie premenlivých potrieb elektrickej energie v elektrizačnej sústave ako sú energetické špičky. Hlavnými zdrojmi energetickej vody sú akumulčné nádrže Liptovská Mara a Orava. Bočné prítoky do rieky Váh majú počas roka premenlivý prietok. Vyrovnávacie nádrže by mali krátkodobo (počas práce VE v energetickej špičke) pokryť rozdiely v prietokoch cez susediace skupiny VE a vykryť rozdiely medzi prítokom do a odtokom z vyrovnávacej nádrže spôsobený postupovou dobou vody z vyššie položenej skupiny VE.

Súbežné pôvodné koryto Váhu s energetickým kanálom by sa malo využívať na:

- prevedenie biologických prietokov,
- prevedenie povodňových prietokov,
- prevedenie jalových prietokov, ktoré sa nemôžu zabezpečiť energetickým kanálom (napr. porucha na VE, odstávka energetického kanála z dôvodu revízie a údržby kanála),
- výnimočne na zabezpečenie navýšenia prietoku pre nižšie položenú skupinu VE.

Umelé energetické kanály majú zabezpečiť minimálne hydraulické straty (prívodné časti kanálov k VE) a potrebnú stabilitu prevádzky (odpadné časti kanálov z VE). Výstavba Vážskej kaskády začala okolo roku 1930. V roku 1936 bola uvedená do prevádzky prvá VE Ladce. VE a derivačné kanály, vybudované na začiatku výstavby, umožňovali svojim dimenzovaním prevažne len pološpičkovú prevádzku. Postupom rokov sa menili názory na funkciu VE a na ich postavenie v elektrizačnej sústave. Preto boli neskôr budované rozmernejšie kanály a VE s väčšou inštalovanou hlnosťou turbín, ktoré v kombinácii s vodnými nádržami v údolí Váhu dnes umožňujú špičkovú prevádzku.



Obr. 3.2. Schéma Vážskej hydroenergetickej sústavy

Najväčší rozmach výstavby Vážskej kaskády bol po druhej svetovej vojne. V tejto dobe sa nestavali len jednotlivé VE, ale súčasne celé skupiny VE. To významne ovplyvnilo celkovú schému Vážskej kaskády. Dnes sú v rámci Vážskej kaskády štyri skupiny kanálových VE, ktoré sú uvedené zhora nadol v tab. 3.1.

Tabuľka 3.1. Skupiny VE na Vážskej kaskáde

Skupina VE	Maximálny energetický prietok [m <sup>3</sup> /s]	
Krpeľany – Sučany – Lipovec	210	(3 x 70)
Hričov – Mikšová – Považská Bystrica	402	(3 x 134)
Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín	150–180	(2 x 75–2 x 90)
Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda	180	(2 x 90)

Na dolnom úseku Váhu je vybudovaná zatiaľ samostatná kanálová VE Madunice s maximálnou inštalovanou hlnosťou turbín 3 x 100 m<sup>3</sup>/s (na obr. 3.2 je v dolnej orámovanej časti obrázku). Táto VE je spolu s haťou Drahovce najjednoduchším článkom Vážskej kaskády, ktorý ale obsahuje všetky dôležité prvky potrebné na modelovanie aj ostatných VE. Z uvedeného dôvodu bola táto VE zvolená ako pilotná z pohľadu vývoja matematického modelu. Príklad skupiny kanálových VE je na obr. 3.2 v hornej orámovanej časti obrázku.

Z hľadiska efektívneho využitia hydropotenciálu Váhu je najvýhodnejšia špičková prevádzka VE Vážskej kaskády. Už od roku 2004 sa však začali postupne uplatňovať trhové ekonomické kritériá, ktoré viedli k zvýšenému záujmu prevádzkovateľa o prietoknú prevádzku VE. Od roku 2006, s prevzatím VE novým vlastníkom spoločnosťou ENEL, sa pravidlá využívania VE dostali do čisto trhovej formy, čo značí, že ak sa predaj elektrickej energie vyrobenej z vodnej energie nepodarí zrealizovať, potom sa vynútený prietok prepúšťa cez pôvodné koryto Váhu ako jalový prietok. Ako vynútený prietok sa považuje odtok z nádrží zabezpečujúci neprekročenie maximálnych prevádzkových hladín vo vodných nádržiach.

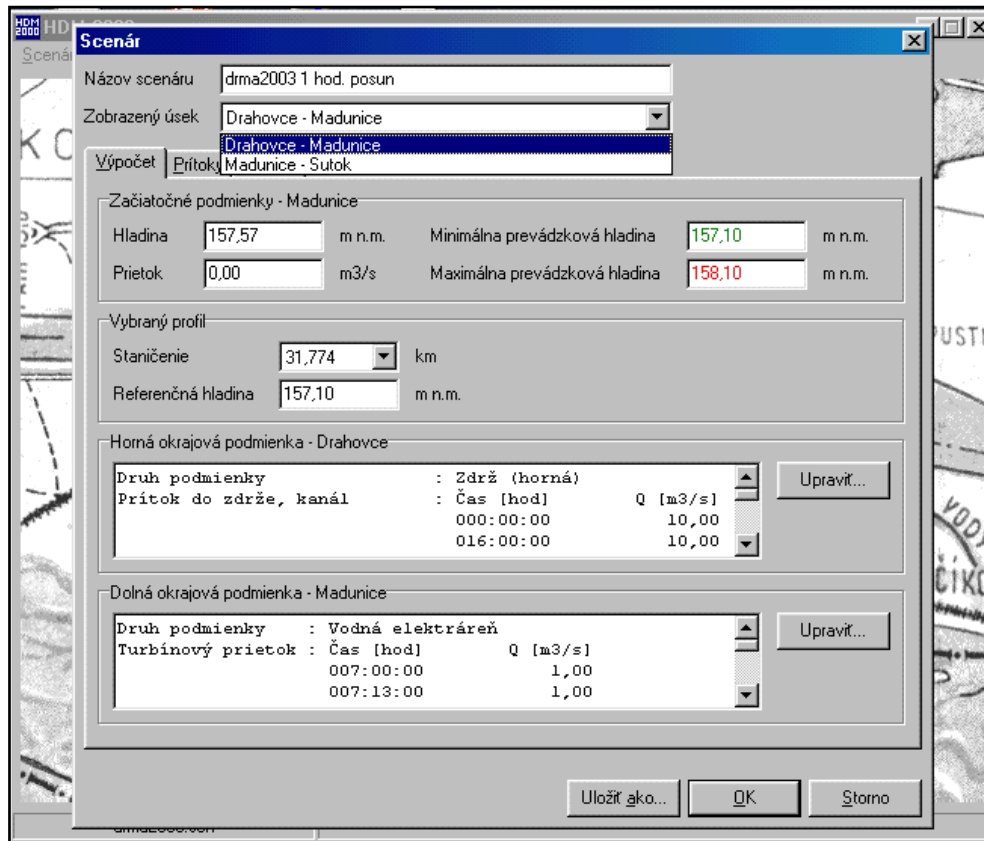
Riadenie Vážskej kaskády je zabezpečované z dispečingu prevádzkovateľa – ENEL – Slovenské elektrárne, a. s., závod Vodné elektrárne so sídlom v Trenčíne. Proces riadenia je výpočtovo optimalizovaný vzhľadom na potreby elektrizačnej sústavy, stavy vody v nádržiach a na momentálne prietokové pomery vo Váhu.

Procesy spúšťania a odstavovania VE sú automatizované. Na riešenie hydraulických väzieb jednotlivých VE a skupín VE boli vypracované hydrodynamické modely (HDM) vo verziách HDM2000 až HDM2006.

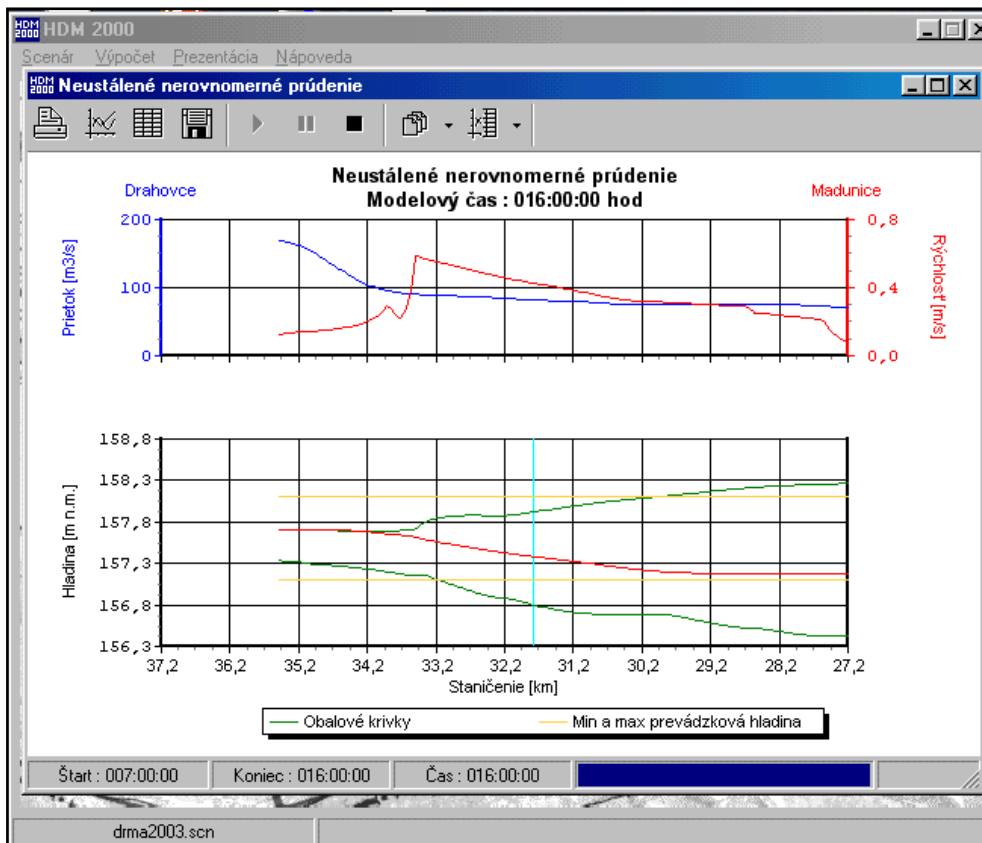
Príprava vstupov do HDM je redukovaná na zadávanie tzv. scenárov, ktoré obsahujú okrajové podmienky a časový vývoj jednotlivých prietokov v modelovanom systéme (obr. 3.3). Počiatkové rozdelenie hladín vody v kanáloch a prietokov je počítané modulom ustáleného nerovnomerného prúdenia (UNP).

Výpočet neustáleného nerovnomerného prúdenia (NNP) je priebežne zobrazovaný vo forme pozdĺžneho rozdelenia vybraných veličín (obr. 3.4). Navyac sú zobrazované obalové

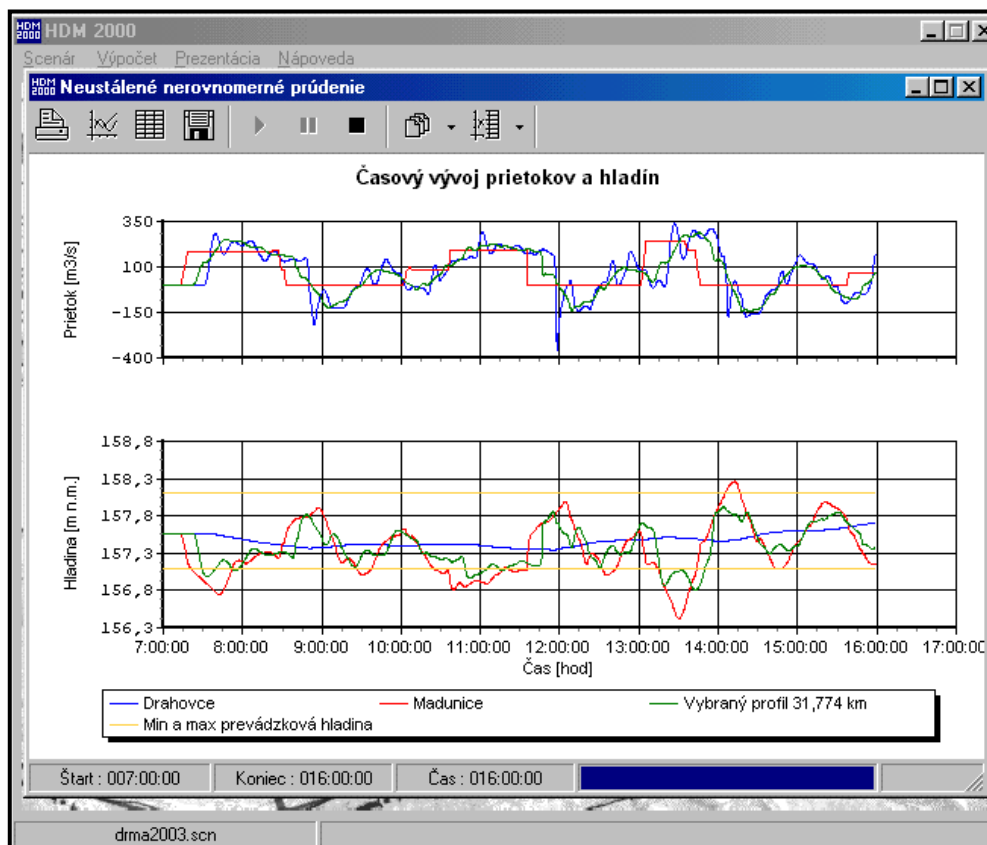
krivky hladiny (maximá a minimá dosiahnutých hladín v priebehu simulácie). Výstupom z modelu po realizácii predpísaného scenára sú krivky s časovým vývojom vybraných veličín v požadovaných profiloch kanálov (obr. 3.5).



Obr. 3.3. Zadávanie scenára pre výpočet modelovanej situácie



Obr. 3.4. Pozdĺžny priebeh vybraných veličín v čase

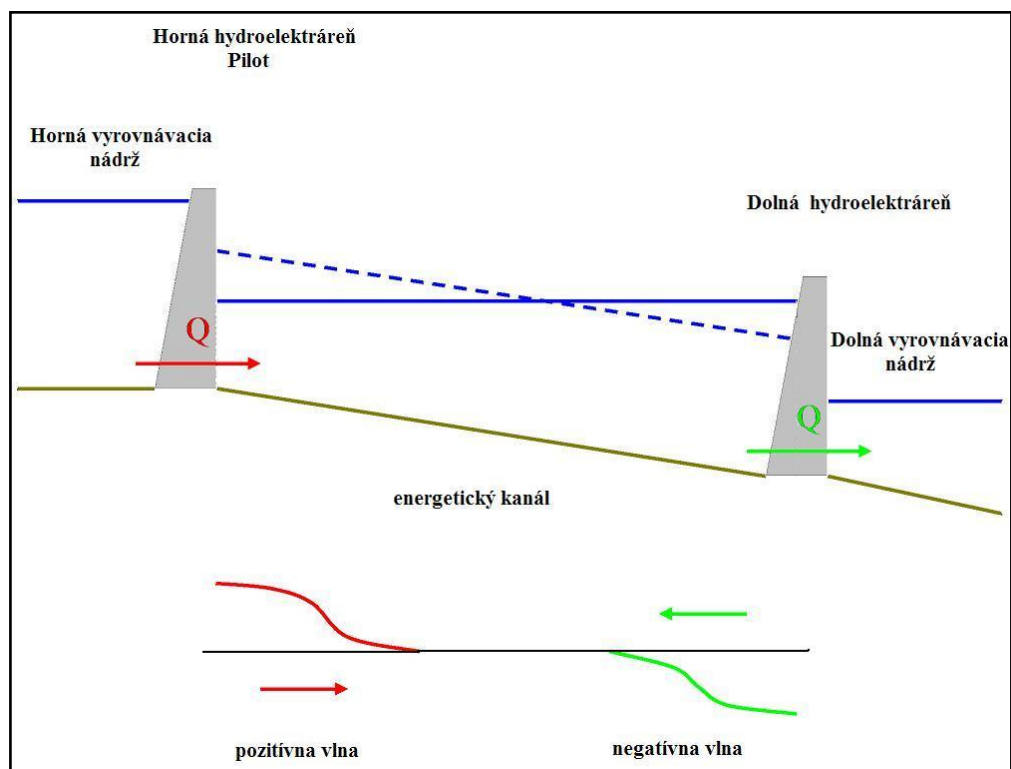


Obr. 3.5. Časový vývoj vybraných veličín v požadovaných profiloch



### 3.5.2 Hydraulické väzby skupiny kanálových VE

Okamžitý prietok v rieke býva zvyčajne menší, ako je celková hltnosť turbín skupiny kanálových VE. Plný výkon možno získať len odberom vody zo zásobného objemu nádrže nad začiatkom derivačného kanála. V prípade Váhu sú navyše skupiny VE súčasťou kaskády, preto sa dajú prietokové pomery ovplyvňovať aj vhodnou reguláciou vyššie ležiacej skupiny kanálových VE.



Obr. 3.6. Schéma usporiadania kanálových VE

Prietokový režim je v tomto prípade regulovaný, preto zaraďujeme takéto skupiny kanálových VE medzi regulačné VE. Cez profil každej VE na derivačnom kanáli preteká zvyčajne rovnaký regulovaný prietok, ktorý VE spracúvajú súčasne alebo postupne a celá skupina býva riadená podľa prvej VE na derivačnom kanáli. Túto VE nazývame aj riadiacou VE skupiny a prevádzku nazývame tandemovou prevádzkou.

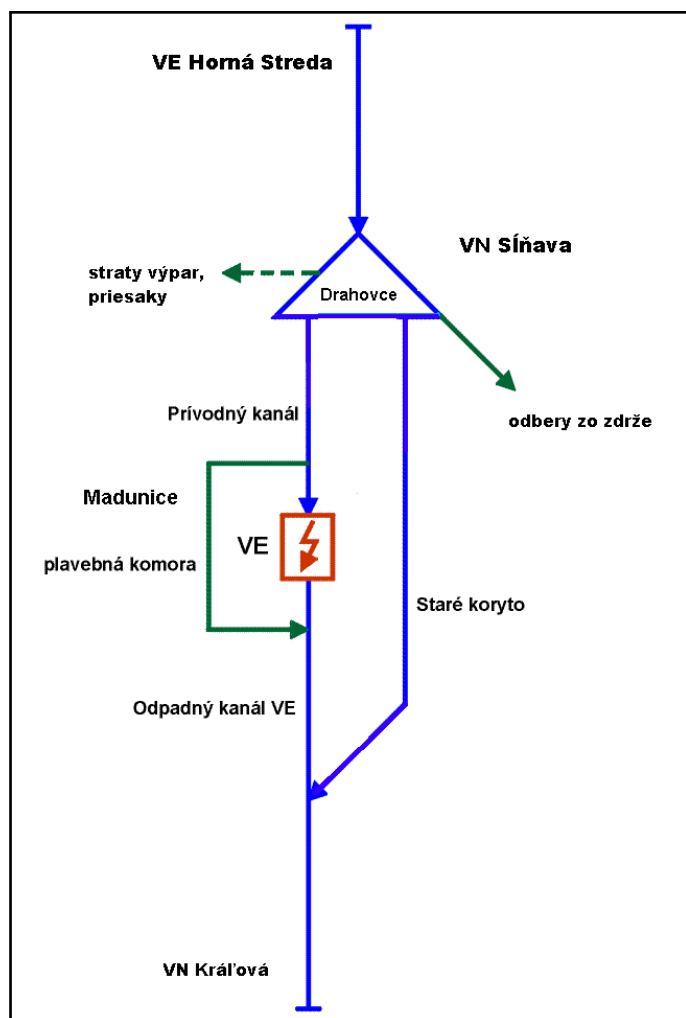
Pri nasadení skupiny VE do tandemovej prevádzky vzniká neustálený pohyb vody v derivačnom kanáli. To isté platí aj pre odstavenie skupiny z prevádzky alebo pre zmenu prietoku počas prevádzky. Ustálený pohyb vody v kanáli nastáva až po dostatočne dlhej dobe prevádzky s kon-

štantným prietokom. Vzhľadom na špičkový charakter prevádzky skupiny VE nemusí pri krátkych špičkách k ustáleniu hladín vôbec dôjsť.

Z vlnového hľadiska tak nastáva pri súčasnom nábehu elektrární na kanáli najnevhodnejšia situácia, keď sa kladná a záporná vlna pohybujú proti sebe (obr. 3.6). Pri nábehu VE do prevádzky je situácia jednoduchšia, lebo prietok cez kanál má stabilizujúci účinok na hladinový režim. Pri odstavení VE z prevádzky, tento stabilizujúci účinok chýba, a preto proces odstavovania z prevádzky musí prebiehať podstatne pomalšie ako nábeh do prevádzky.

### 3.5.3 Matematický model VE Madunice

VE Madunice je súčasťou vodného diela Drahovce – Madunice (hydraulická schéma je na obr. 3.7) a z pohľadu matematického modelovania je to najjednoduchšia časť Vážskej kaskády.



Dajú sa tu ľahko aplikovať modelovacie postupy overené na ostatných kanálových vodných elektrárnach, založené na dekompozícii modelovanej sústavy na modelované úseky. Tie majú samostatne definované okrajové podmienky. Súčasne sa na ňom môžu overovať zložitejšie postupy vedúce k reálnejšiemu a komplexnému opisu prebiehajúcich dejov na základe interakcie koryta vrátane vodných nádrží s umelými kanálmi vodných elektrární.

Obr. 3.7. Schéma VD Drahovce – Madunice

V tejto kapitole bude opísaný hydrodynamický model (ďalej HDM) VE Madunice ako model kanálovej vodnej elektrárne s hornou okrajovou podmienkou typu vodnej nádrže a dolnou okrajovou podmienkou typu prepadu cez kamennú prehrádzku v oblasti sútoku odpadného kanála z VE Madunice a pôvodného koryta Váhu.

Matematický model VE Madunice bol riešený na základe výsledkov hydrodynamického modelovania hladinového režimu v kanáloch VE prevádzkovaných Vodnými elektrárnami Trenčín od roku 1995. Hladinový režim v prívodnom a odpadnom kanáli VE vrátane prechodových javov pri nábehu alebo odstavení z prevádzky patrí k dôležitým charakteristikám riadenia kanálových VE, a to nielen z energetického, ale hlavne z bezpečnostného hľadiska. Hladinový režim v kanáloch VE bol riešený ako neustálené nerovnomerné prúdenie, ktoré je charakterizované časovou zmenou prietokov a hladín v jednotlivých profiloch otvoreného koryta. Pri pozvoľnej zmene týchto veličín (plynulé vlny) sa dá fyzikálna podstata prúdenia vody v kanáli vyjadriť základnou sústavou parciálnych diferenciálnych rovníc Saint–Venanta.

Z modelového hľadiska bolo vodné dielo Drahovce – Madunice (model VE Madunice) rozdelené na dva parciálne modely:

- parciálny model prívodného kanála (hať Drahovce – VE Madunice),
- parciálny model odpadného kanála (VE Madunice – prehrádzka pri sútoku odpadného kanála a pôvodného koryta Váhu).

Priečne profily kanálov, ako vstupné topologické údaje do modelu, boli získané z projektovej dokumentácie k výstavbe. Jediným zisteným rozdielom oproti dokumentácii bola horná kóta prehrádzky na sútoku odpadného kanála a pôvodného koryta Váhu, kde bola zameraná kóta 139,10 m n. m., oproti projektovanej hodnote 139,40 m n. m. Túto skutočnosť potvrdilo aj meranie kóty hladiny pod VE pri ustálenom bezprevádzkovom (neprietočnom) stave. Ďalšie zmeny súčasného stavu profilov kanálov oproti projektovanému stavu sa môžu očakávať hlavne v prípade prívodného kanála v dôsledku zanášania sedimentmi zo zdrže Drahovce.

Objemová krivka zdrže Drahovce ako aj prietokové krivky cez objekty vodného diela boli prevzaté z manipulačného poriadku.

Meranie na vodnom diele Drahovce – Madunice sa uskutočnilo dňa 7. 9. 2002. Prietok cez VE Madunice bol riadený podľa požadovaného scenára pokusov a je zobrazený na obr. 3.9. V rámci pokusu boli prepúšťané cez VE Madunice tri prietokové špičky s cieľom overiť hydrodynamické vlastnosti modelu HDM 2000. Rozdielna hodnota prietoku v rámci pokusu č. 3 (tretia špička prietoku cez VE) medzi meraným prietokom cez VE Madunice (iba turbínový

prietok) a prietokom zadaným do modelu (celkový prietok cez VE) je spôsobená zápočtom prietoku cez sklopenú klapku plavebnej komory. Požadovaný prietok blízky maximálnemu  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  sa nemohol dosiahnuť ako turbínový, pretože boli v čase pokusu v prevádzke iba 2 turbíny. Neštandardné bolo aj ukončenie 2. prietokovej špičky 2-sekundovým odrezaním vodného lúča od vtoku do turbín. Tomuto postupu a možnosti jeho matematického modelovania je venovaná samostatná diskusia v závere tejto časti.

Submodel odpadného kanála pracuje s okrajovými podmienkami:

- dolná okrajová podmienka typu  $Q(h)$  – prietok ponad prehrádzku na sútoku v závislosti od kóty hladiny,
- horná okrajová podmienka typu  $Q(t)$  – prietok cez VE v závislosti od času.

Dolná okrajová podmienka  $Q(h)$  nebola doposiaľ prevádzkovateľom VD zameraná, a preto bola určená experimentálne na základe meraní priebehov hladín v rámci pokusov 1. a 2. a bola verifikovaná v rámci pokusu č. 3.

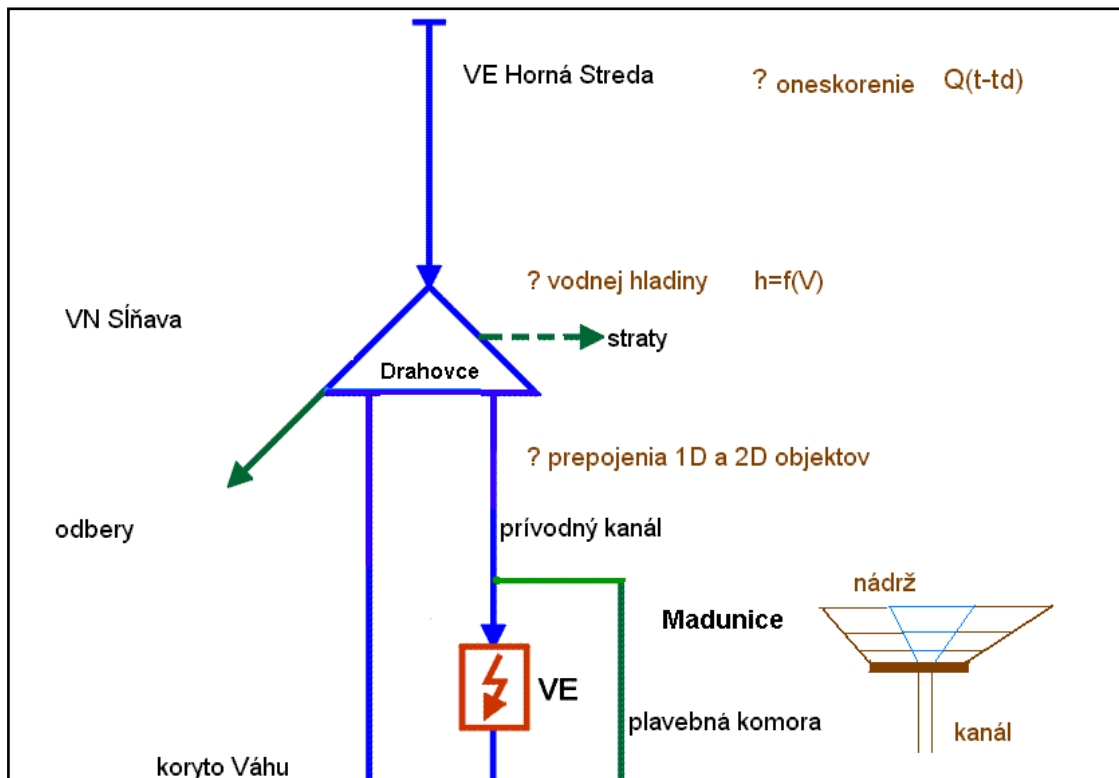
Submodel prírodného kanála pracuje s okrajovými podmienkami:

- horná okrajová podmienka typu  $h(t)$  – kóta hladiny na hati Drahovce v závislosti od času, prepočítaná z objemovej krivky zdrže Drahovce na základe bilancie prítokov a odtokov vody zo zdrže,
- dolná okrajová podmienka typu  $Q(t)$  – prietok cez VE v závislosti od času.

Pre riešenie problematiky napojenia prírodného kanála na vyrovnávaciu nádrž bol použitý matematický model nádrže založený na objemovej bilancii nádrže (rovnica 3.9).

Na obr. 3.8 je zobrazená schéma riešenia spolu s riešenými otázkami v rámci zostavenia matematického modelu:

- oneskorenie prítoku z vyššie položenej skupiny VE do oblasti hate Drahovce,
- časová zmena výšky hladiny v oblasti hate Drahovce,
- zaústenie prírodného kanála do zdrže Drahovce (VN Sĺňava).



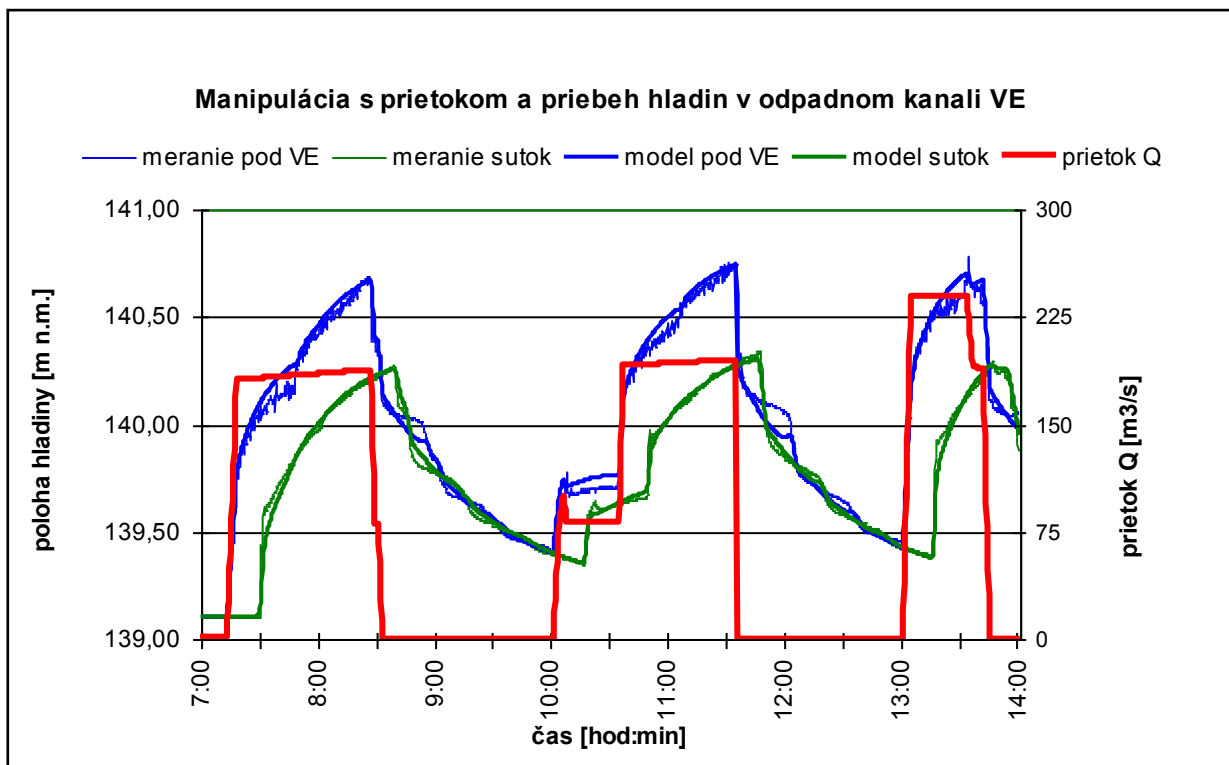
Obr. 3.8. Schéma riešenia prívodného kanála VD Drahovce – VE Madunice

V rámci dynamického výpočtu hornej okrajovej podmienky je rozhodujúci prítok (v rámci energetickej prevádzky) z VE Horná Streda. Prítok do zdrže Drahovce (VN Sĺňava) v mieste hate Drahovce sme započítavali s oneskorením (postupová doba), ktoré bolo určené experimentálne na základe požiadavky zhody zameranej hladiny na hati Drahovce s vypočítanou hladinou v tomto profile modelom.

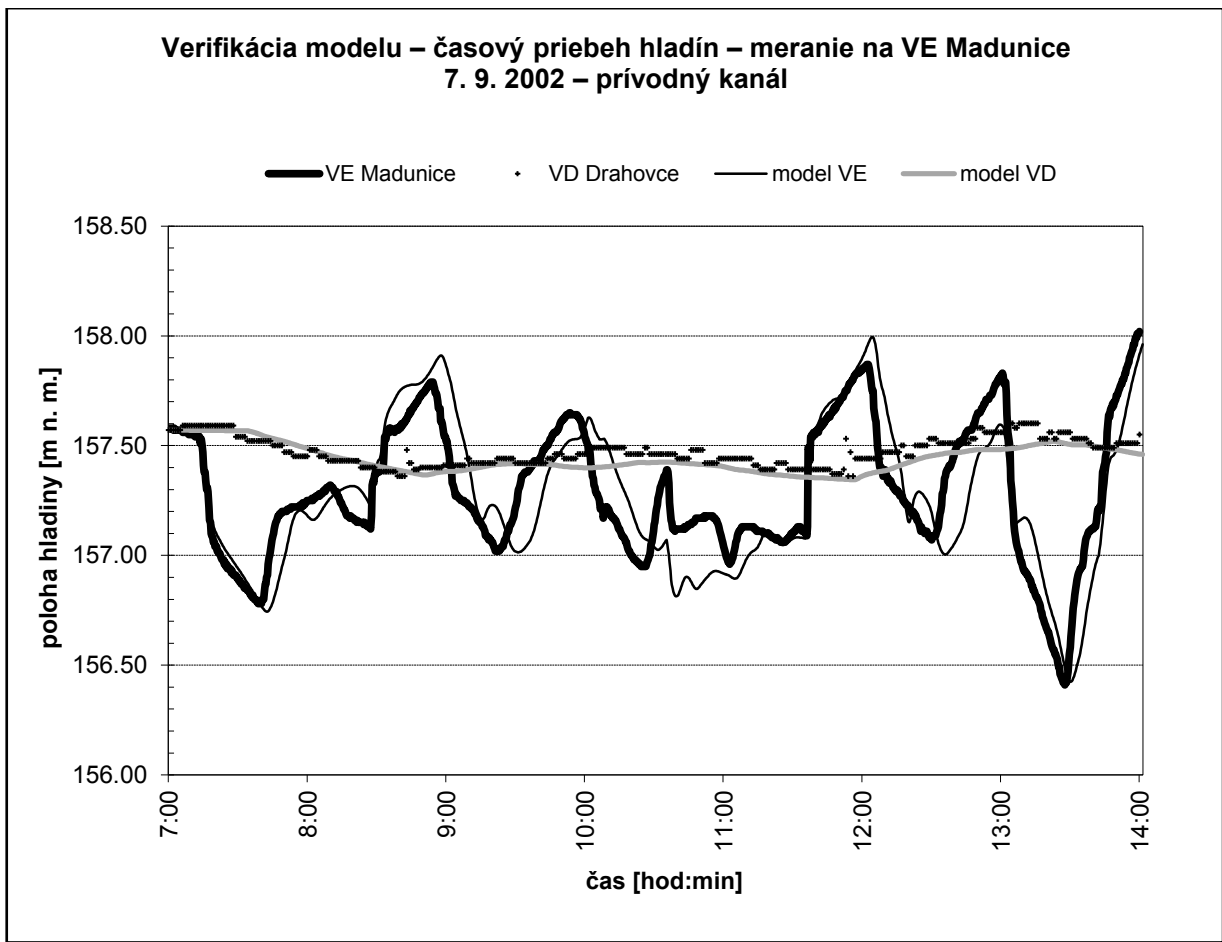
Porovnanie výsledkov modelu a merania v teréne na odpadnom kanáli sú zobrazené na obr. 3.9. Porovnávané sú dve najdôležitejšie hladiny, a to hladina na začiatku a na konci modelovaného úseku. Modelovaná oblasť je krátka (4,6 km) a zhoda bola dosiahnutá veľmi dobrá. Vzhľadom na pomerne krátke prevádzkové špičky (maximálne 1,5 hodiny) nebolo pozorované výrazné ovplyvnenie dejov v odpadnom kanáli v dôsledku stúpajúcej hladiny vody v prírodnom koryte Váhu pod oddeľujúcou prehrádzkou.

Zložitejšia situácia je pri modelovaní prívodného kanála, kde stabilizácia hladiny prebieha podstatne dlhšie. Model dosiahol podstatne lepšie výsledky pri vyšších prietokoch (pokusy č. 1 a 3). Najväčšia chyba nastala pri pokuse č. 2, keď pokus štartoval do neustáleného stavu s relatívne malým prietokom (točivá rezerva), ktorý má aj malý stabilizačný účinok. Pomerne značná chyba vznikla s narastajúcim časovým posuvom riešenia modelom oproti reálnemu deju (reálna

vlna predbieha modelové riešenie), čo v ďalšom pri sčítaní vlny v kanáli s vlnou vytvorenou manipuláciou vedie k opačnému správaniu sa modelu k modelovanému deju. Časový posun riešenia sa nepodarilo výrazne znížiť ani výrazným znížením koeficientu drsnosti dna modelovanej oblasti, a preto predpokladáme výrazné zmeny v topológii prívodného kanála v dôsledku zanášania prívodného kanála zo zdrže Sĺňava.



Obr. 3.9. Verifikácia modelu – odpadný kanál VE Madunice



*Obr. 3.10. Verifikácia modelu – prívodný kanál VE Madunice*

Na obr. 3.10 sú porovnané dva výsledky z modelovania prívodného kanála:

- časový priebeh hladiny na hati v Drahovciach – splnenie hornej okrajovej podmienky,
- časový priebeh hladiny nad VE Madunice pri zadanom prietoku cez VE.

Z prevádzkového hľadiska je dôležité minimalizovať hydraulické straty na energetických kanáloch. Tým sa dosiahne maximálny čistý spád na VE a maximálna produkcia elektrickej energie. Lokálne hydraulické straty spôsobujú hlavne hrubé nečistoty zachytené na hrabliciach medzi hat'ou Drahovce a prívodným kanálom. Praktické skúsenosti aj výsledky modelovania dokázali, že hydraulické straty na hrabliciach sa ďalej propagujú v prípade kanála VD Drahovce – VE Madunice až na svoj zhruba dvojnásobok pre neoptimálne prevedenie prietoku cez prívodný kanál. Vzhľadom na to, že na hati Drahovce v čase pokusu nebolo nainštalované žiadne čistiace zariadenie, obsluha VE si pomáhala vytvorením spätnej vlny z prívodného kanála do

hate Drahovce prudkým znížením prietoku cez VE Madunice. Spätná vlna odtrhne nečistoty od hrubých hrablic (obr. 3.11).

Samotná spätá vlna tesne pred haťou Drahovce je zobrazená na obr. 3.12 (profil rkm = 0,050 na obr. 3.13). Hoci samotné meranie v teréne nebolo pripravené na tak rýchle deje a bolo realizované s 20-sekundovým krokom, získali sa aj tak cenné údaje pre vývoj modelov opisujúcich takéto rýchle zmeny hydraulických veličín. Na obr. 3.13 sú zobrazené niektoré namerané a modelované priebehy hladín v časovej lupe tesne po prudkom odstavení prietoku cez VE Madunice v 11:35 hod. Na výsledkoch z modelovania je zreteľné utlmenie krátkych vln na čele spätnej vlny.

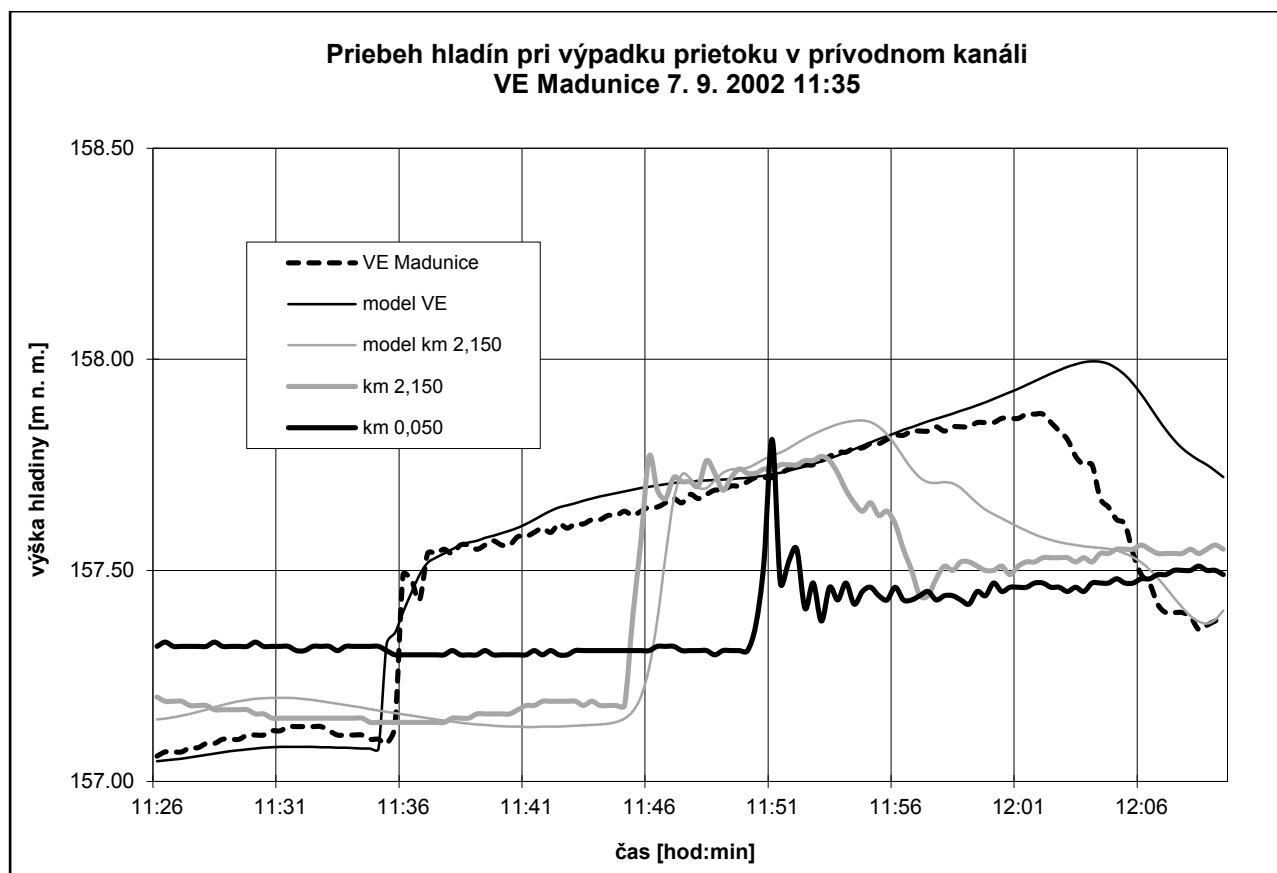


*Obr. 3.11. Odtrhnutie hrubých nečistôt od hrablic spätnou vlnou – hať Drahovce*





Obr. 3.12. Spätná vlna tesne pred haťou Drahovce (profil 0,050 rkm)



Obr. 3.13. Výpadok v prietoku na VE Madunice 7. 9. 2002

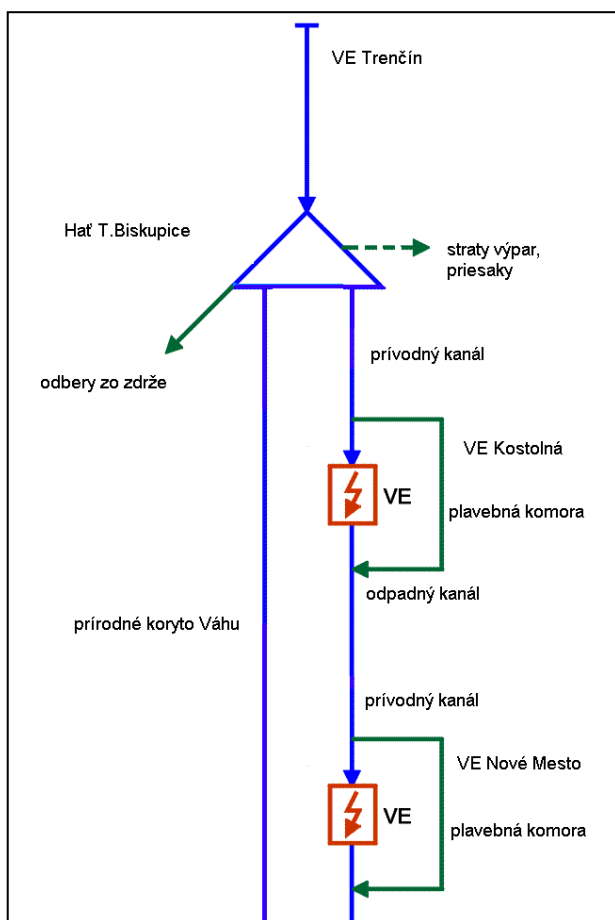
Z vlastného merania, kamerového záznamu a modelovania sa získali dôležité poznatky:

- 2 sekundové odstavenie prietoku cez turbíny sa transformovalo v hornej zdrži nad VE Madunice na začiatku prírodného kanála na zhruba 20-sekundové zníženie prietoku v celom profile prírodného kanála,
- spätná vlna má výrazne zvlnené čelo vlny,
- pre diskretizáciu Saintových–Venantových rovníc už nebude postačujúca 4-bodová implicitná Preismanova schéma (HECRAS, SOBEK), vhodnejšia sa ukazuje 6-bodová Abottova–Ionescova implicitná schéma (MIKE 11), prípadne zložitejšie schémy založené na splinoch. Prezentované výsledky poukazujú na možnosti modelovania hladinového režimu v kanáloch VE v rámci energetickej prevádzky a boli prvým krokom k modelovaniu interakcie energetickeho kanála VE s vodohospodárskou nádržou. Realizovaný scenár pokusov bol podstatne tvrdší ako reálna prevádzka, ktorú tvoria spravidla dve 4-hodinové prevádzkové špičky v priebehu jedného dňa. Pri modelovaní reálnej prevádzky VE je súlad medzi modelom a modelovaným dejom podstatne lepší.

K ďalšiemu skvalitneniu modelu by prispela integrácia prírodného koryta Váhu do matematického modelu, čo by umožnilo jeho využitie aj pri modelovaní situácií so zvýšeným až povodňovým prietokom. Model VD Drahovce–Madunice sa využil aj pri príprave merania hladinového režimu na VE Madunice pri regulačnej prevádzke a pri modelovaní interakcie energetickej a pripravovanej plavebnej prevádzky na VD Madunice.

#### **3.5.4 Matematický model VE Kostolná – VE Nové Mesto**

Hydroenergetická schéma skupiny kanálových VE Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda pozostáva z troch VE na spoločnom derivačnom kanáli. Zhora aj zdola je ohraničená zdržami vytvorenými haťami Trenčianske Biskupice a Drahovce.



Obr. 3.14. Schéma skupiny VE Kostolná – VE Nové Mesto

Pribudnú teda úseky (medzikanály) zdrž – prvá VE skupiny a posledná VE skupiny – zdrž. Za okrajové podmienky riešenia režimu prúdenia vo vtokovom a výtokovom profile potom uvažujeme okrajovú podmienku typu poloha hladiny ako funkcia času.

Výsledky výpočtov neustáleného prúdenia na skupine kanálových VE majú široké a rôznorodé použitie. Môžeme ho rozdeliť na dve základné oblasti:

- vypracovanie zásad manipulácie so skupinou VE,
- prevádzka.

Z fyzikálneho hľadiska každá VE predstavuje singulárny bod, v ktorom možno definovať hydraulické parametre prúdenia a aj jeho časový priebeh. Pri riešení hydraulického režimu sa nemusí teda riešiť celá skupina naraz. Derivačný kanál je rozčlenený na jednotlivé úseky vždy medzi dvoma VE (medzikanály).

Hydroenergetická schéma skupiny kanálových VE Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda obsahuje ešte prívodný kanál od zdrže Trenčianske Biskupice po VE Kostolná a odpadný kanál od VE Horná Streda do zdrže Drahovce. V tomto prípade vtokový aj výtokový profil celej skupiny VE predstavujú takisto singulárne body, v ktorých sa môže sústava tiež rozdeliť.

Pod prvou oblasťou sa rozumejú výpočty najmä v štádiu predprojektovej a projektovej prípravy, resp. v štádiu skúšobnej prevádzky, potrebné na vypracovanie manipulačných poriadkov. Pri týchto výpočtoch sa predovšetkým:

- vymedzuje rozsah prípustného kolísania hladín pri špičkovej prevádzke. Vymedzujú sa najmä limitné hladiny s prihliadnutím na spôsoby a rôznorodosť prevádzky skupiny VE v závislosti od potrieb elektrizačnej sústavy,
- spresňujú prevádzkové hladiny v kanáloch tak, aby nedochádzalo k prelievaniu horných hrán tesnení kanálov,
- navrhujú prevádzkové opatrenia, za akých bude celé vodné dielo spoľahlivo plniť svoju funkciu,
- posudzujú prípadné technické opatrenia na kanáloch a VE (pri starších napr. ich rekonštrukcia, zväčšovanie kapacity).

Pod druhou oblasťou sa rozumie využitie pri samotnej prevádzke. Hydrodynamické modely slúžia dispečerovi pri operatívnom riadení. Pomocou nich môže efektívne prepočítať hladinový režim pre rôzne aktuálne varianty prevádzky.

Exaktnejším určením hydraulických väzieb skupín kanálových VE a výpočtami na hydrodynamických modeloch sa dá zlepšiť plánovanie a riadenie prevádzky. Konečným efektom je spoľahlivejšia prevádzka so zachovaním regulačných funkcií VE.

Na nasledujúcich obrázkoch sú prezentované dve aplikácie využitia matematického modelovania skupiny VE Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda:

1. Aplikácia ukazuje výsledky modelovania prívodného kanála zo zdrže Trenčianske Biskupice do VE Kostolná. Variant 1 ukazuje klasický postup modelovania izolovanej skupiny VE s použitím hornej okrajovej podmienky typu konštantná výška hladiny v hornej zdrži, ktorý nedáva výsledky s požadovanou presnosťou. Variant 2 využíva hornú okrajovú podmienku typu zdrž, kde sa požadovaný časový priebeh hladiny v zdrži získava z bilančného modelu zdrže so započítaním vplyvu prevádzky na VE Skalka. Porovnanie oboch variantov je na obr. 3.15.

2. Aplikácia ukazuje vplyv zmeny drsnosti kanála a jeho dopad na hydrodynamiku neustálených javov pri nábehu, resp. odstavení VE z prevádzky kanála VE Kostolná – VE Nové Mesto nad Váhom. Variant 1 ukazuje priebeh hladín pri hodnote drsnosti kanála  $n = 0,016$ , ktorá bola ako priemerná určená prof. Gabrielom na základe výskumov ukončených v roku 1970. Na základe meraní ustálených hladín pri prevádzke na kanáloch VE v polovici 90. rokov a následnom modelovaní však vychádza priemerná drsnosť kanálov okolo  $n = 0,020$ . Táto hodnota bola použitá pri výpočte variantu 2. Porovnanie oboch variantov je na obr. 3.16.

Zvýšenie drsnosti kanála vedie síce k stabilizácii prechodových javov v kanáli VE, ale súčasne k nežiaducemu poklesu spádu vody na VE až o 0,55 m, a tým k poklesu produkcie elektrickej energie (obr. 3.17).

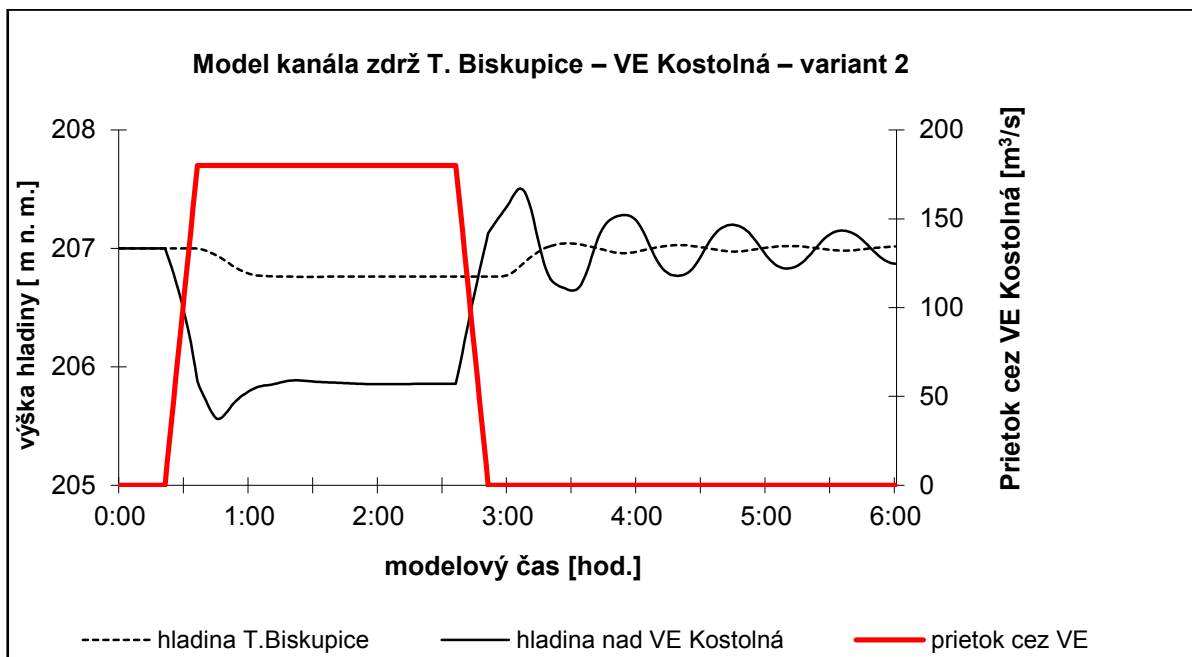
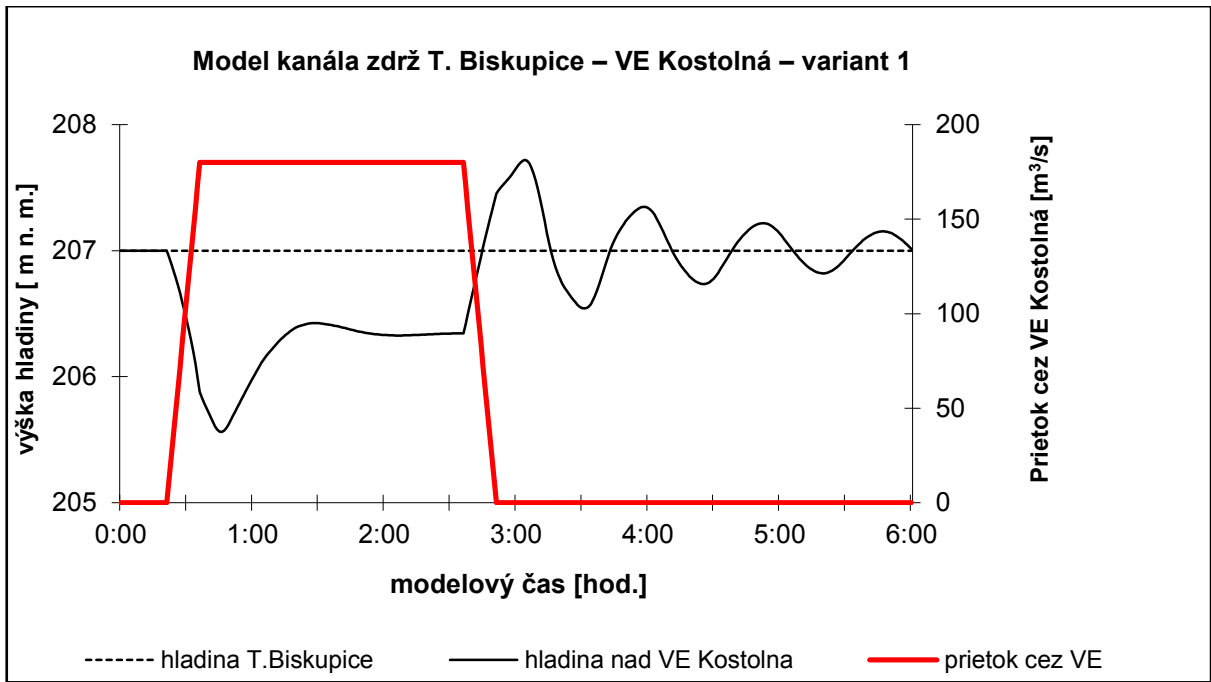
Pokles na výrobe elektrickej energie bol počítaný ako rozdiel na výkone na VE medzi variantom 1 a variantom 2. Elektrický výkon je daný vzorcom:

$$P = gQ_T H_C \eta \quad (3.9)$$

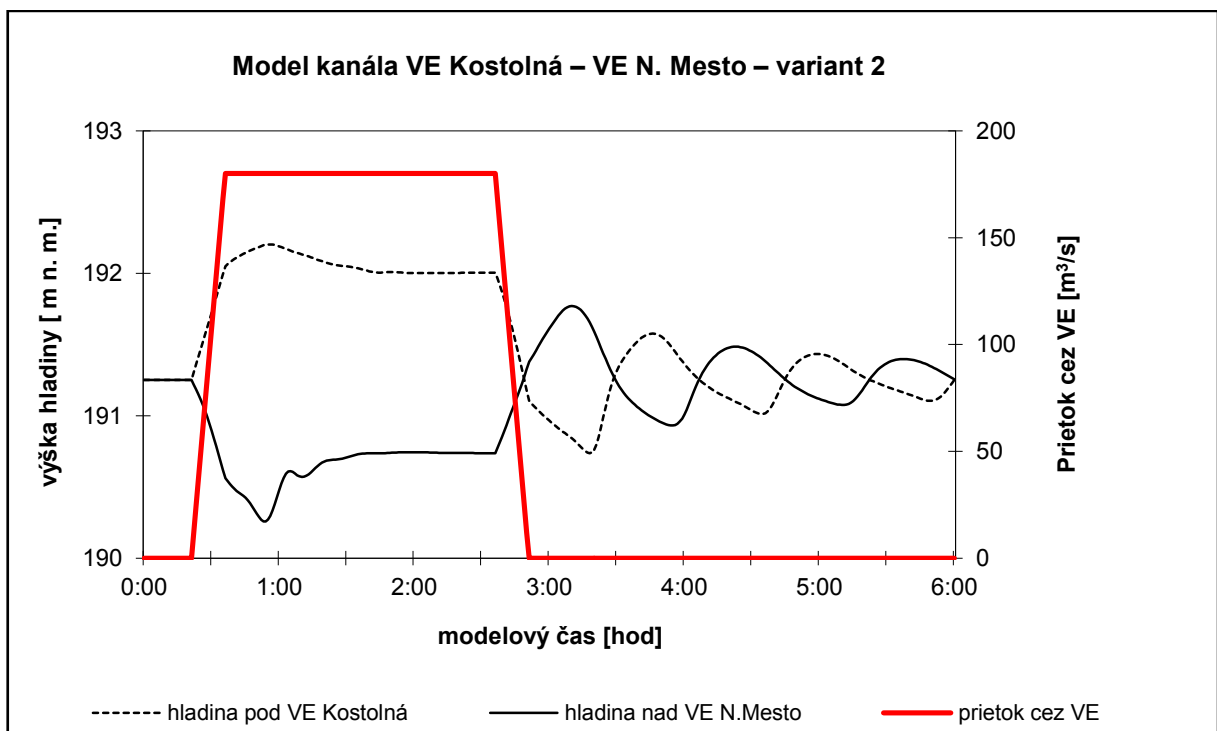
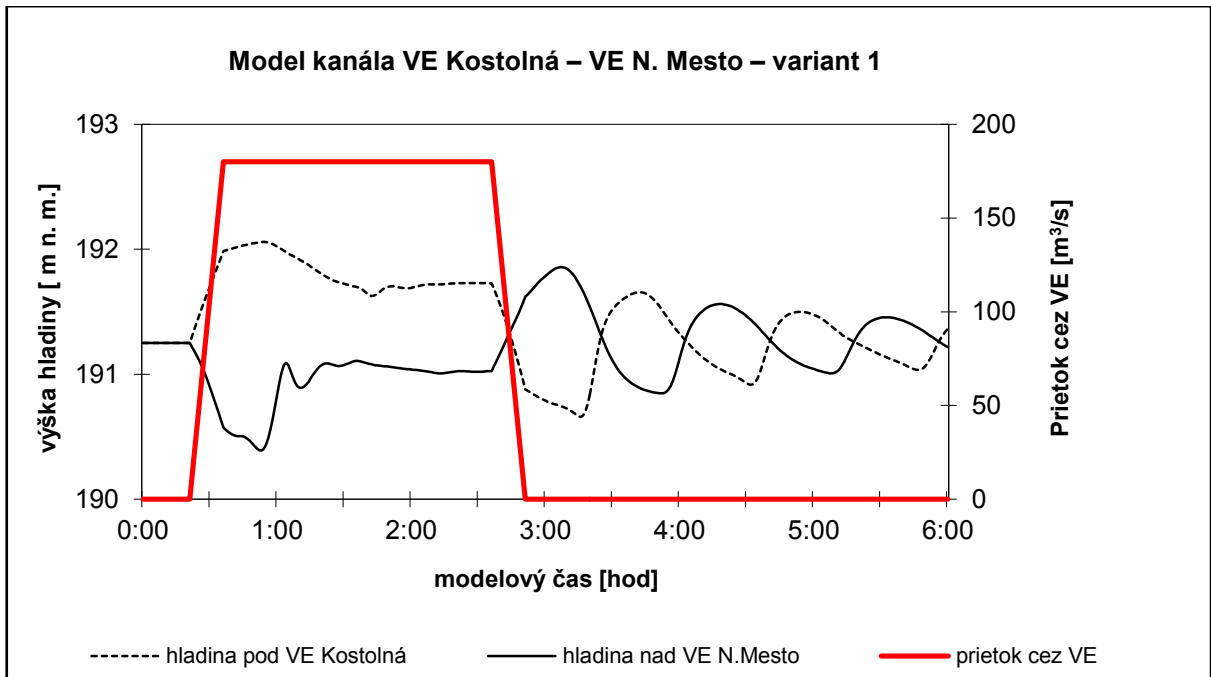
kde je $P$	je	elektrický výkon	[kWh],
$Q_T$	–	turbínový prietok	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ],
$H_C$	–	čistý spád vody na VE	[m],
$\eta$	–	celková účinnosť premeny energie	[–].

Uvedené aplikácie ukazujú na potrebu riešenia modelu prevádzky Vážskej kaskády ako celku. Dôležitou otázkou je z energetického hľadiska aj postupné nežiaduce zvyšovanie drsnosti dna umelých energetických kanálov.

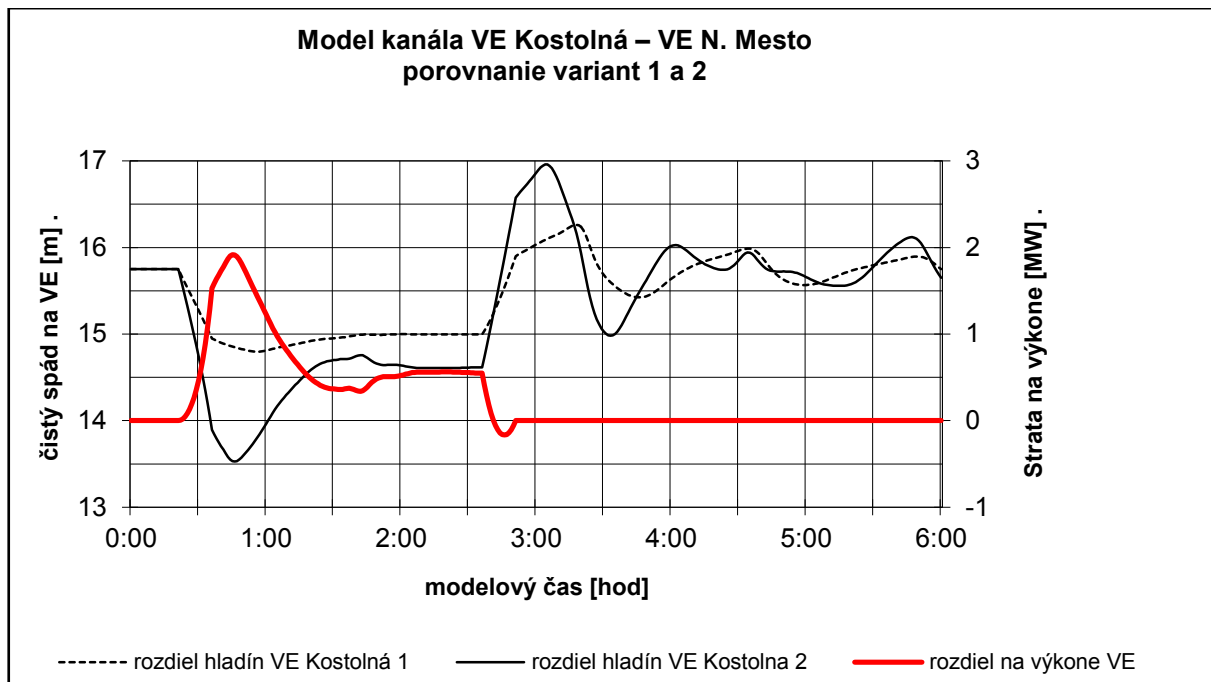
Hodnota turbínového prietoku určená z elektrického výkonu vodnej elektrárne (úpravou vzťahu 3.9) sa môže pri opravách, alebo výmene turbín za modernejšie, zmeniť. Dôvodom je zmena účinnosti. Potom bude potrebné upraviť aj užívateľské programy na základe hodnôt získaných z garančných meraní.



*Obr. 3.15. Aplikácia hornej okrajovej podmienky typu zdrž*



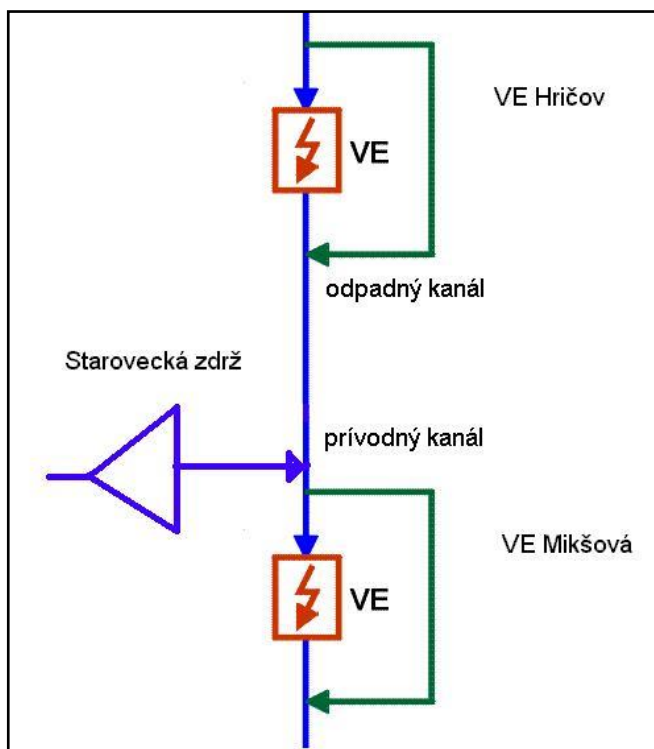
*Obr. 3.16. Aplikácia zmeny drsnosti dna kanála*



Obr. 3.17. Pokles čistého spádu na VE a strata na elektrickom výkone

### 3.5.5 Matematické modelovanie interakcie bočnej zdrže a prívodného kanála VE Mikšová

Prívodný kanál VE Mikšová je najdlhší kanál Vážskej kaskády. Pred VE Mikšová sa



nachádza bočná pravostranná zdrž, ktorá má vplyv na hladinový režim nad VE Mikšová (schéma na obr. 3.18). Prvé pokusy o matematické modelovanie interakcie bočnej zdrže a energetického kanála boli realizované VÚVH koncom 60. rokov kolektívom pod vedením prof. Gabriela. Prívodný kanál VE Mikšová I Nadväzuje na odpadný kanál VE Hričov (3,598 km). Dĺžka prívodného kanála je 12,82 km. Kapacitne patrí tento kanál tiež k najväčším – je dimenzovaný na zvýšený prietok až  $504 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Obr. 3.18. Schéma kanála VE Hričov – VE Mikšová

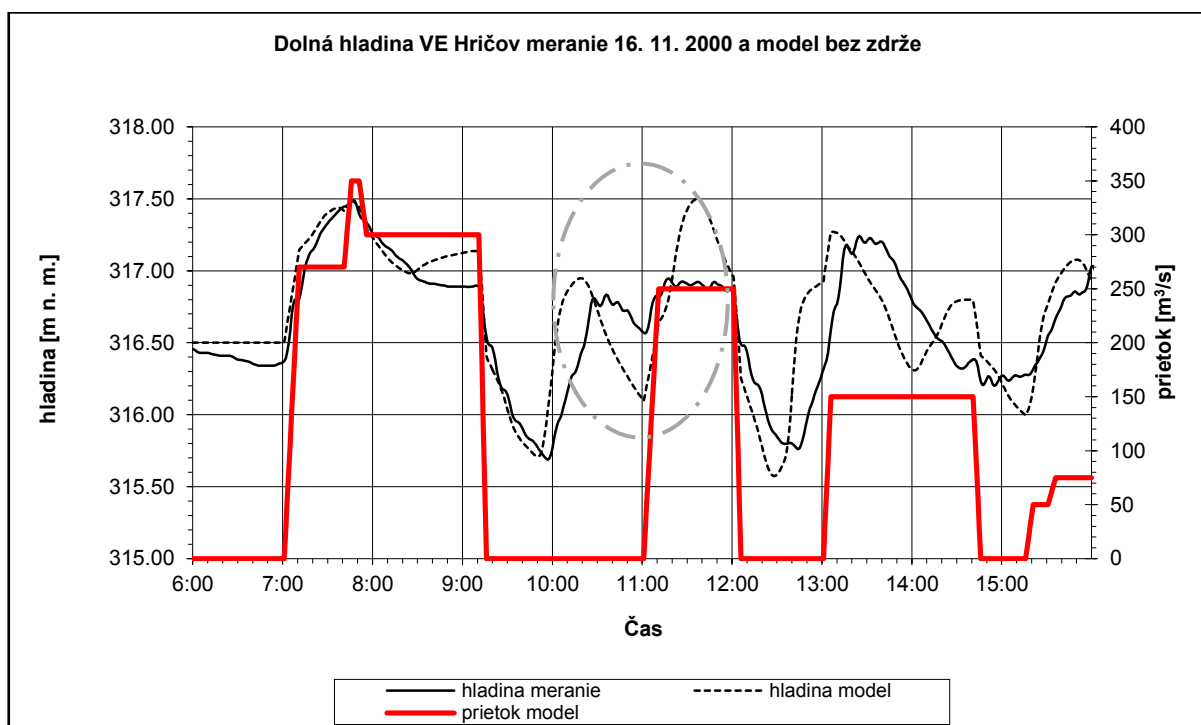


Priemerná šírka kanála v dne je 26 m so sklonom návodných svahov 1 : 2. Kanál má niekoľko prechodových úsekov, kde sa rozširuje alebo zužuje. Je tesnený betónovým plášťovým tesnením. V km 15,421 až 15,874 je vynechaná pravostranná hrádza kanála. V tomto mieste sa nachádza Starovecká nádrž, do ktorej je zaústený potok Štiavnik (km 15,8).

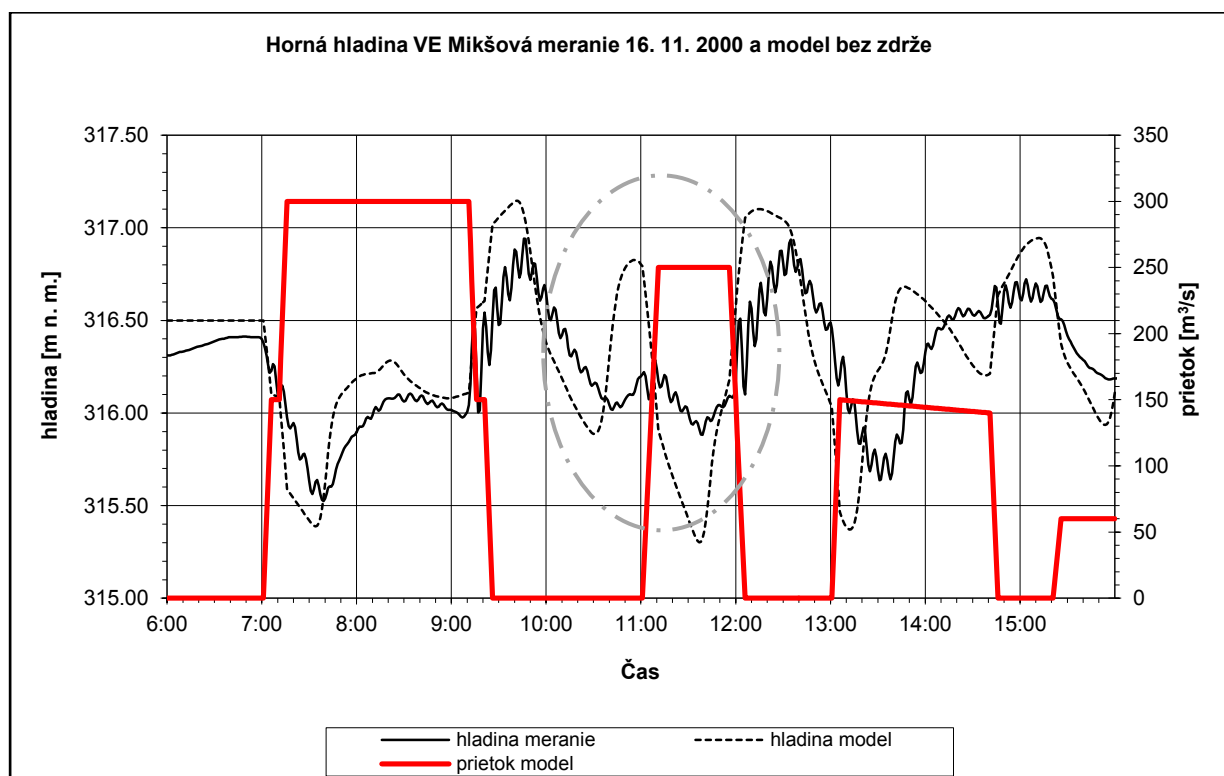
Pri nasadení skupiny VE do tandemovej prevádzky vzniká neustálený pohyb vody v derivačnom kanáli. To isté platí aj pre odstavenie skupiny z prevádzky alebo pre zmenu prietoku počas prevádzky. Ustálený pohyb vody v kanáli nastáva až po dostatočne dlhej dobe prevádzky na konštantný prietok. Vzhľadom na špičkový charakter prevádzky skupiny VE nemusí pri krátkych špičkách k ustáleniu vôbec dôjsť. Tu majú dôležitú úlohu ďalšie hydraulické prvky, napr. bočný polder, ktoré môžu pri správnej manipulácii tmiť nežiaduci vlnový režim v kanáli.

Pre potreby verifikácie matematického modelu na úseku VE Hričov – VE Mikšová bolo realizované koncom roku 2000 meranie hladín v kanáli pri výrazne dynamickej prevádzke. Manipulácia s prietokom v kanáli sa skladala z troch špičiek s dĺžkou od 1 do 2 hodín, s prietokmi od 150 do 300 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> a s dĺžkou prestávok medzi špičkami od 1 do 2 hodín. Matematický model bol testovaný v dvoch verziách. Prvá verzia, ktorá bola úspešne verifikovaná na ostatných kanáloch Vážskej energetickej kaskády a je bez simulácie interakcie s bočnou zdržou (obr. 3.19 – 3.20). Výsledky z modelu v tomto prípade môžeme považovať ako teoretické hodnoty, ktoré by boli dosiahnuté v kanáli pri prevádzke bez prítomnosti bočnej zdrže. Porovnaním meraných hladín s výsledkami modelovania vidíme zásadný vplyv na tlmenie vlnového režimu a to hlavne nad VE Mikšová. Problematické oblasti (označené zelenou elipsou) vznikajú pri nábehu z neustáleného stavu (2. prietoková špička), keď výsledky modelu sú v časovom posune oproti vlastnému meraniu na kanáli.

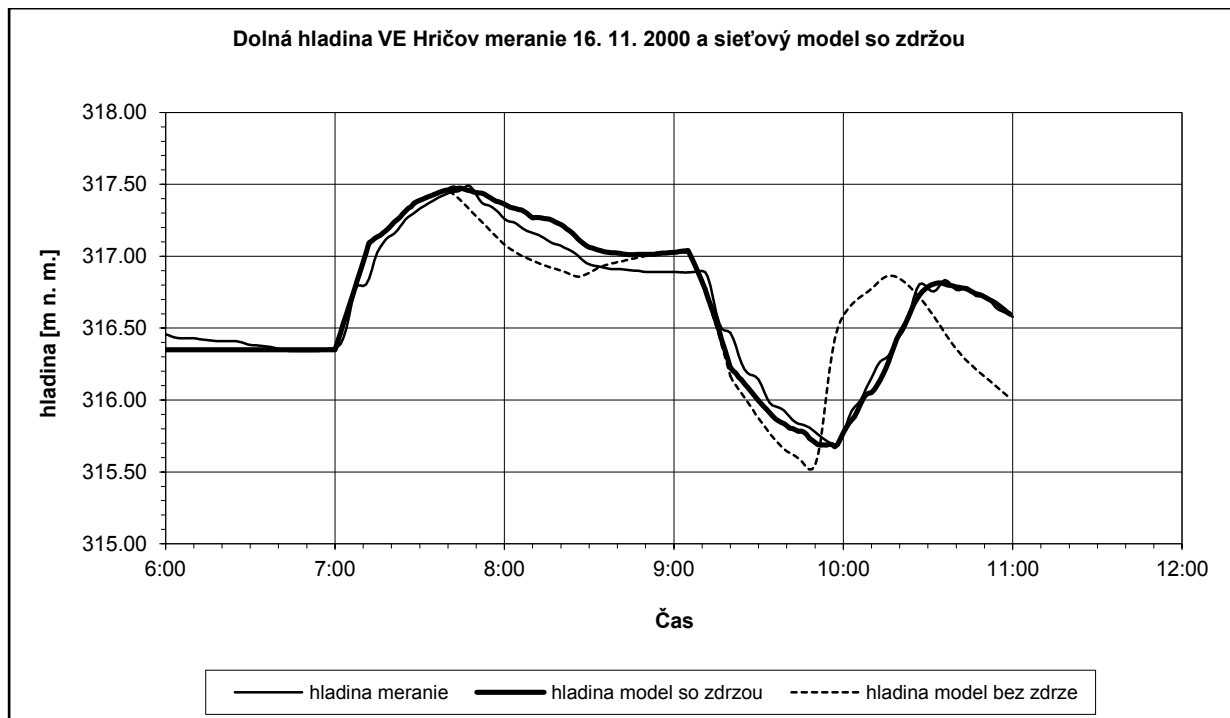
Druhá verzia výpočtu bola realizovaná už programom HDM upraveným pre vzájomné prepojenie viacerých modelových segmentov výpočtu. Bočná nádrž bola ďalej modelovaná ako prietočná nádrž s topografickými parametrami odhadnutými z mapových podkladov. Výsledky modelovania interakcie medzikanála s bočnou nádržou sú na obr. 3.21 – 3.22. Bola dosiahnutá dobrá zhoda medzi meranými hodnotami hladín a modelovanými hladinami nielen v prírodnej (horná hladina nad VE Mikšová) ale aj odpadnej časti medzikanála (dolná hladina pod VE Hričov). Miera interakcie bočnej nádrže s energetickým kanálom sa dá posúdiť podľa obr. 3.23. Na základe realizovaných meraní a experimentov s modelovaním interakcie Staroveckej nádrže s kanálom VE Hričov – VE Mikšová sa môže konštatovať, že na exaktné modelovanie interakcie kanála s bočnou zdržou bude potrebné realizovať zameranie topológie Staroveckej nádrže (predpokladá sa značné zanesenie sedimentmi z potoku Štiavnik) a meranie hladinového režimu pre potreby verifikácie aj priamo v Staroveckej nádrži.



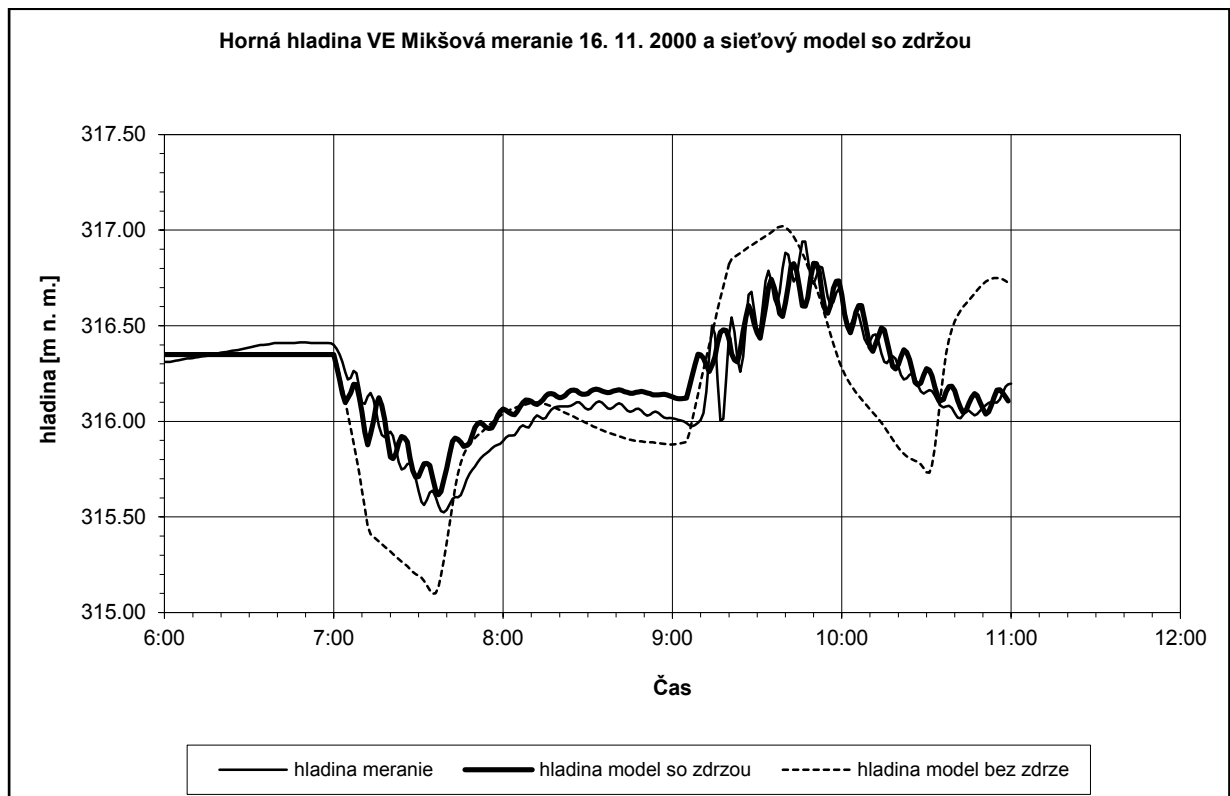
Obr. 3.19. Porovnanie výsledkov merania a modelu bez bočnej zdrže



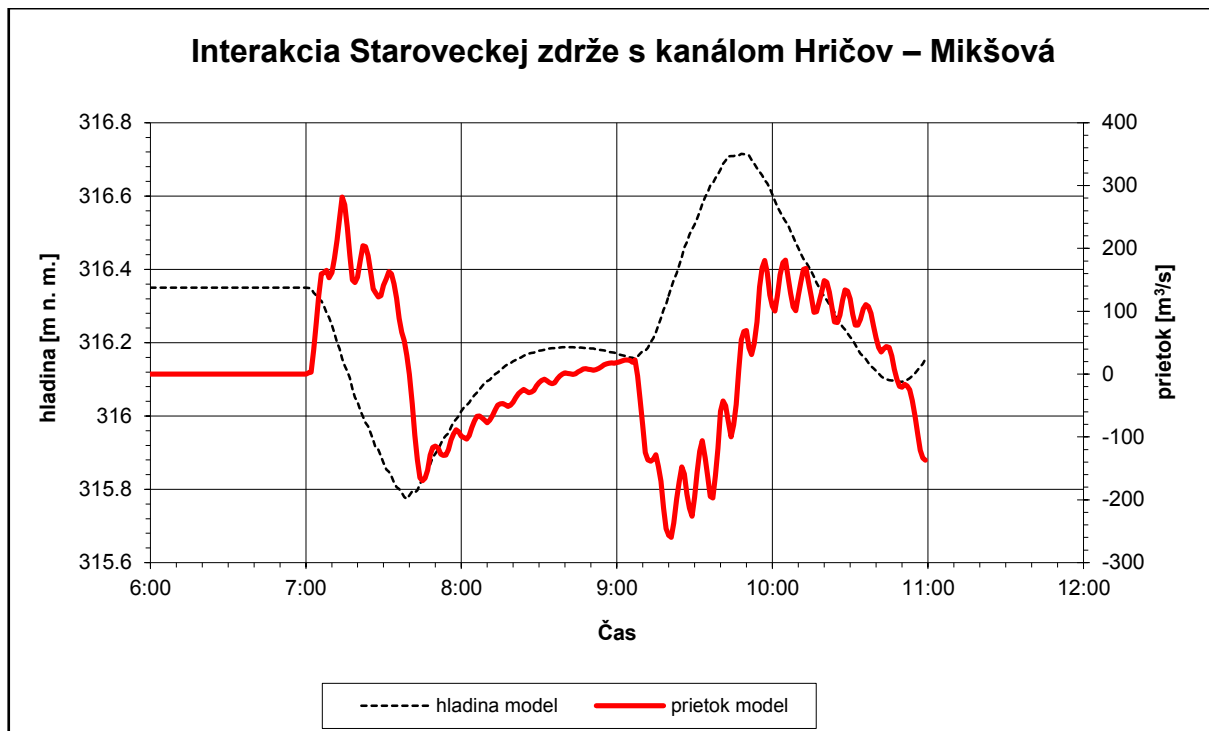
Obr. 3.20. Porovnanie výsledkov merania a modelu bez bočnej zdrže



*Obr. 3.21. Porovnanie výsledkov merania a modelu s bočnou zdržou*



*Obr. 3.22. Porovnanie výsledkov merania a modelu s bočnou zdržou*



Obr. 3.23. Interakcia bočnej nádrže s kanálom v mieste zaústenia

## 4 ANALÝZA PREVÁDZKY SKUPÍN KANÁLOVÝCH VE

Pre overenie reálneho systému fungovania kanálových VE Vážskej kaskády a využívania ich regulačných funkcií bola urobená analýza prevádzky na vzorke záznamov – polhodinových odpočtoch prietokov cez VE Vážskej kaskády.

Polhodinové odpočty boli spracované podľa reálnych záznamov dispečingu VE Trenčín o prevádzke. K dispozícii boli poskytnuté údaje za mesiace január a august 1998 (zimný a letný mesiac). Na základe týchto údajov bola urobená analýza prietokov z hľadiska porovnania ich veľkosti s hĺtnosťami VE. Analýza bola urobená pre všetky riadiace VE jednotlivých skupín (t. j. prvé VE v skupine), teda:

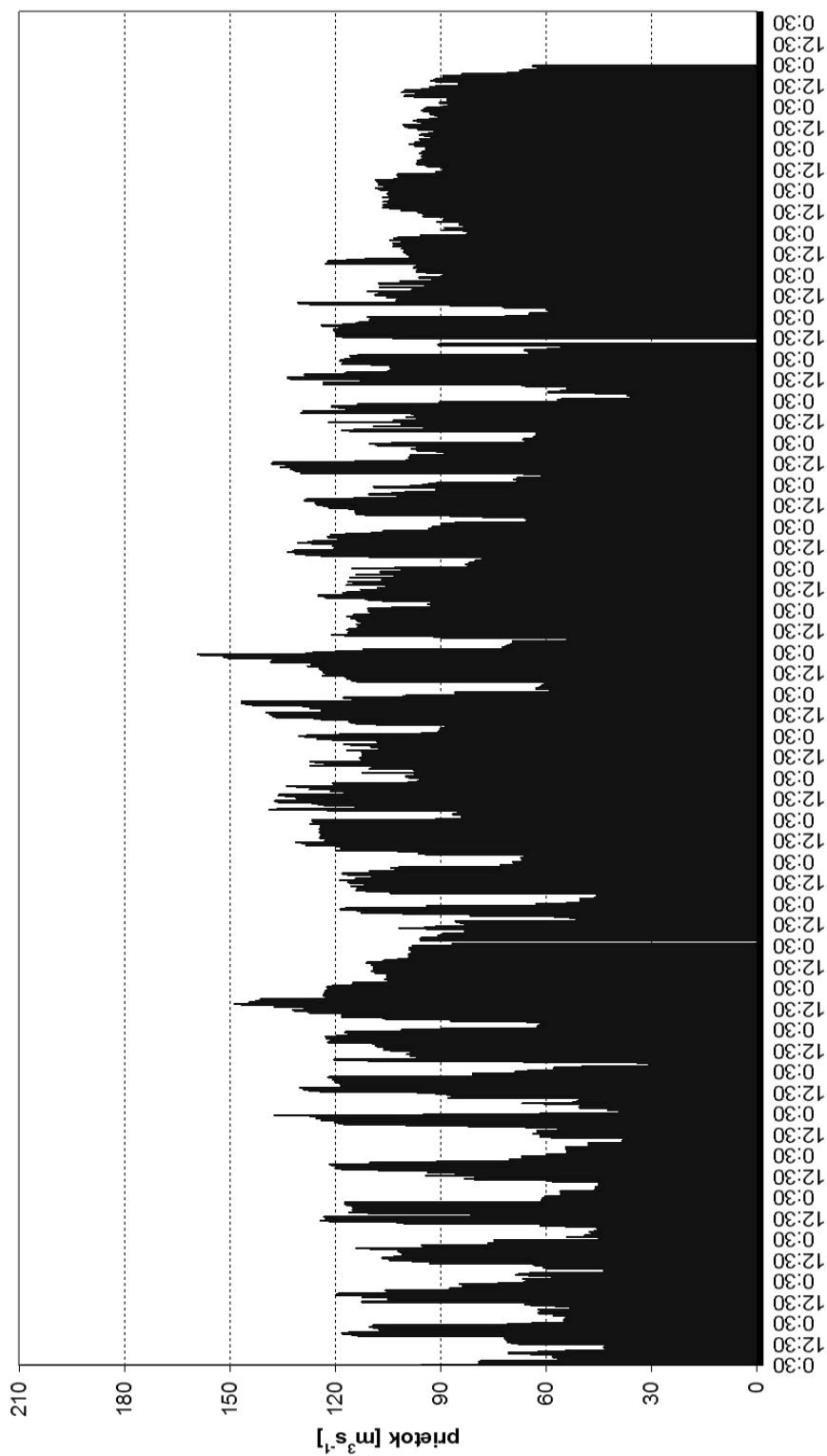
- |  |                  |
|--|------------------|
| 1. u skupiny VE Krpeľany – Sučany – Lipovec            | pre VE Krpeľany, |
| 2. u skupiny VE Hričov – Mikšová I – Považská Bystrica | pre VE Hričov,   |
| 3. u skupiny VE Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín      | pre VE Ladce,    |
| 4. u skupiny VE Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda   | pre VE Kostolná. |

Ostatné VE príslušných skupín pracujú v tandeme podľa riadiacich VE, preto sa výsledky analýzy prevádzky riadiacich VE dajú aplikovať aj na ostatné VE v príslušnej skupine. Analýzou bolo sledované, s akým skutočným prietokom v porovnaní s inštalovanými hĺtnosťami turbín pracovali predmetné VE. Boli preto vynesené grafy závislosti skutočného prietoku cez riadiacu VE. Spracovanie výpisov prietokov sa nachádza na grafoch 4.1 až 4.8 takto:

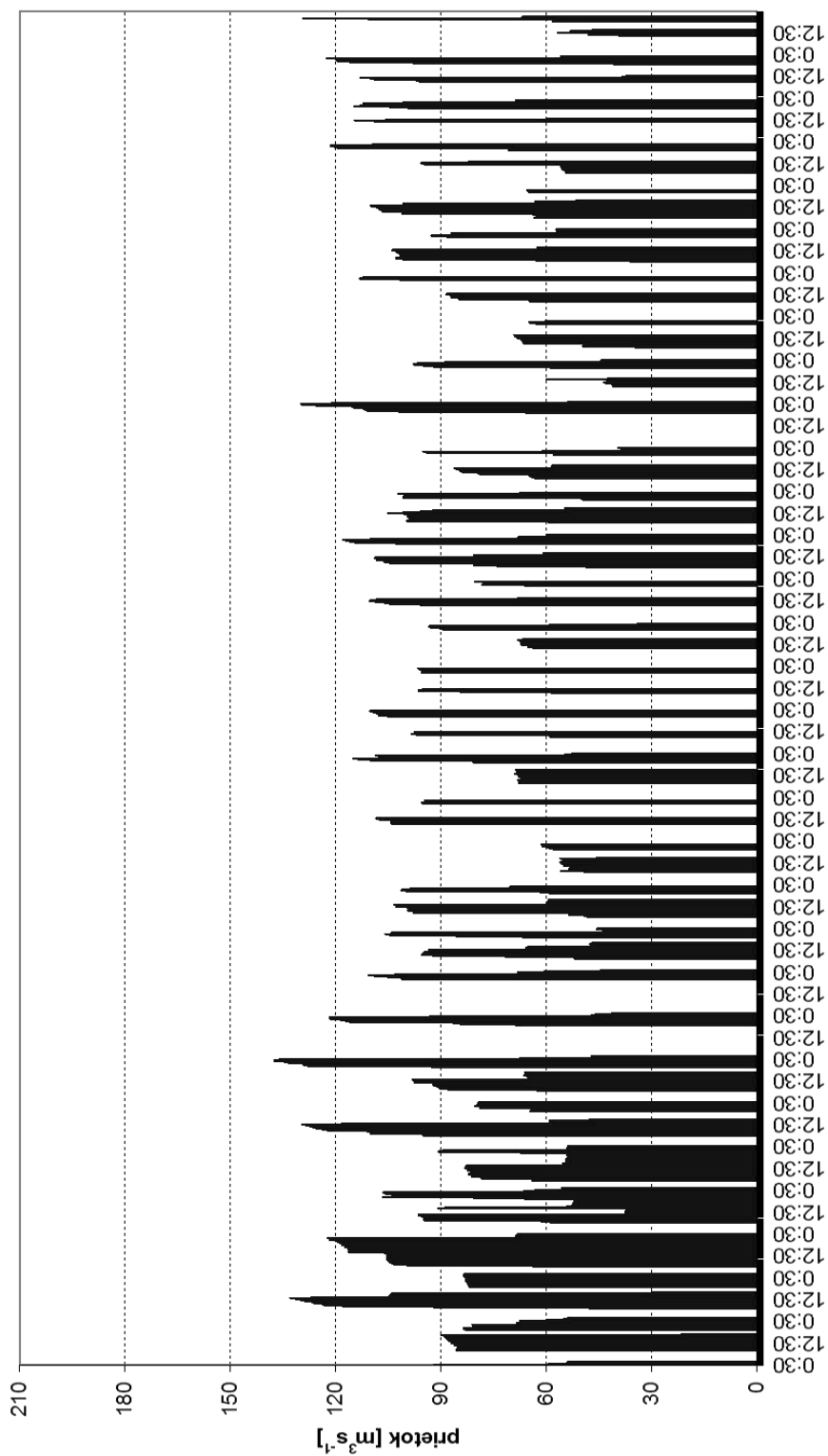
- Graf 4.1. VE Krpeľany – výpis prietokov z polhodinového protokolu – január 1998;
- Graf 4.2. VE Krpeľany – výpis prietokov z polhodinového protokolu – august 1998;
- Graf 4.3. VE Hričov – výpis prietokov z polhodinového protokolu – január 1998;
- Graf 4.4. VE Hričov – výpis prietokov z polhodinového protokolu – august 1998;
- Graf 4.5. VE Ladce – výpis prietokov z polhodinového protokolu – január 1998;
- Graf 4.6. VE Ladce – výpis prietokov z polhodinového protokolu – august 1998;
- Graf 4.7. VE Kostolná – výpis prietokov z polhodinového protokolu – január 1998;
- Graf 4.8. VE Kostolná – výpis prietokov z polhodinového protokolu – august 1998.

Na základe vykonaného posúdenia sa dalo konštatovať, že skúmané VE (a tým aj celé skupiny VE) pracovali väčšinu času v hodnotenom období so skutočnými prietokmi, ktoré boli nižšie, ako sú inštalované hltnosti turbín. S prietokmi na úrovni inštalovanej hltnosti turbín pracovala v sledovanom období len VE Ladce v mesiaci január a VE Kostolná tiež v mesiaci január. Je to dané zrejme tým, že išlo o zimné mesiace, keď sú zvýšené nároky na regulačné služby VE pre elektrizačnú sústavu a tým, že uvedené VE (a následne aj príslušné skupiny VE) majú na Vážskej kaskáde najmenšie inštalované hltnosti turbín. Z hľadiska skutočných spracovaných prietokov mali skúmané VE po väčšinu sledovaného času rezervu oproti inštalovanej hltnosti turbín.

VE Krpeľany – výpis prietokov z polhodinového protokolu - január 1998

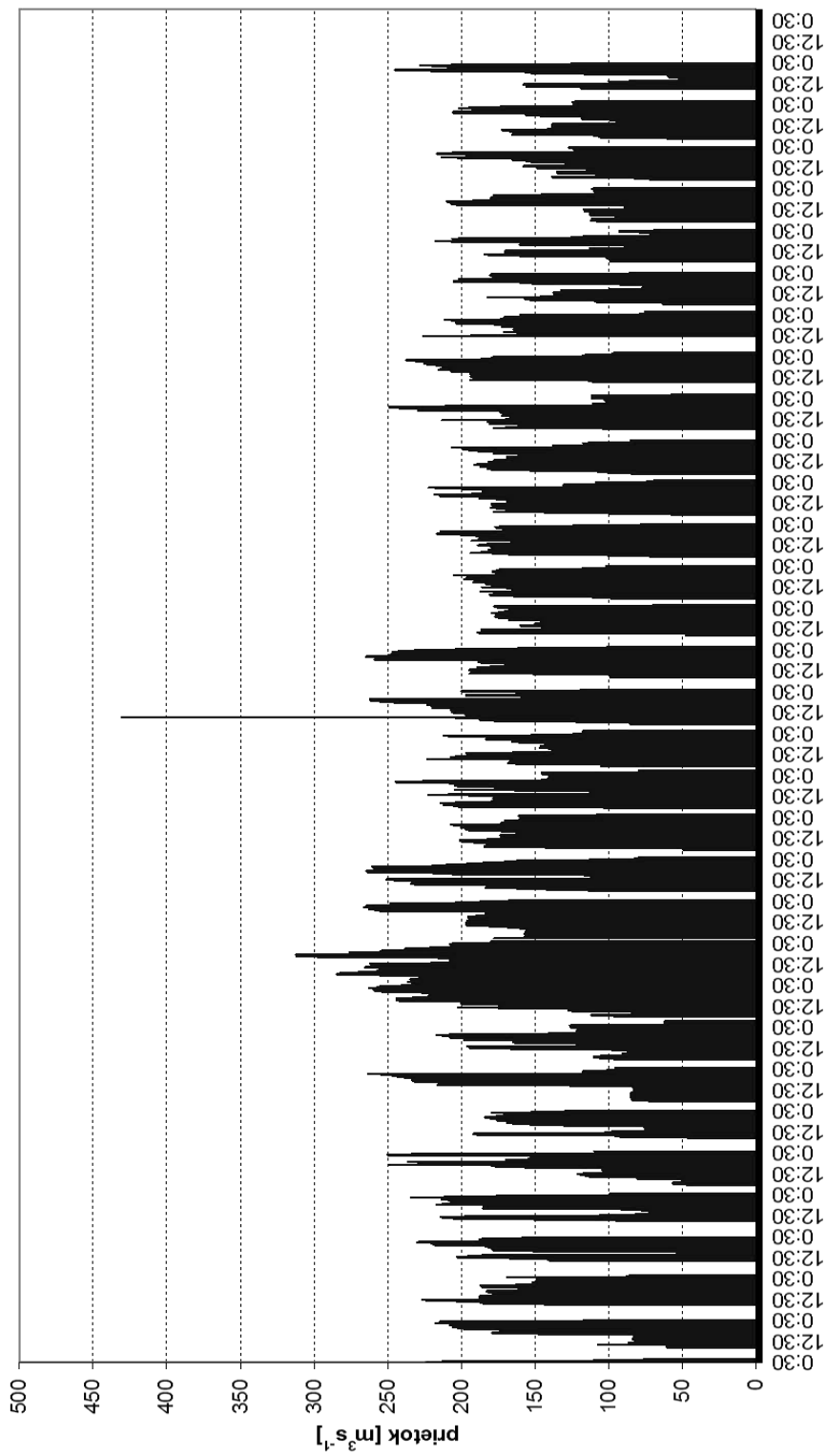


VE Krpeľany – výpis prietokov z polhodinového protokolu - august 1998

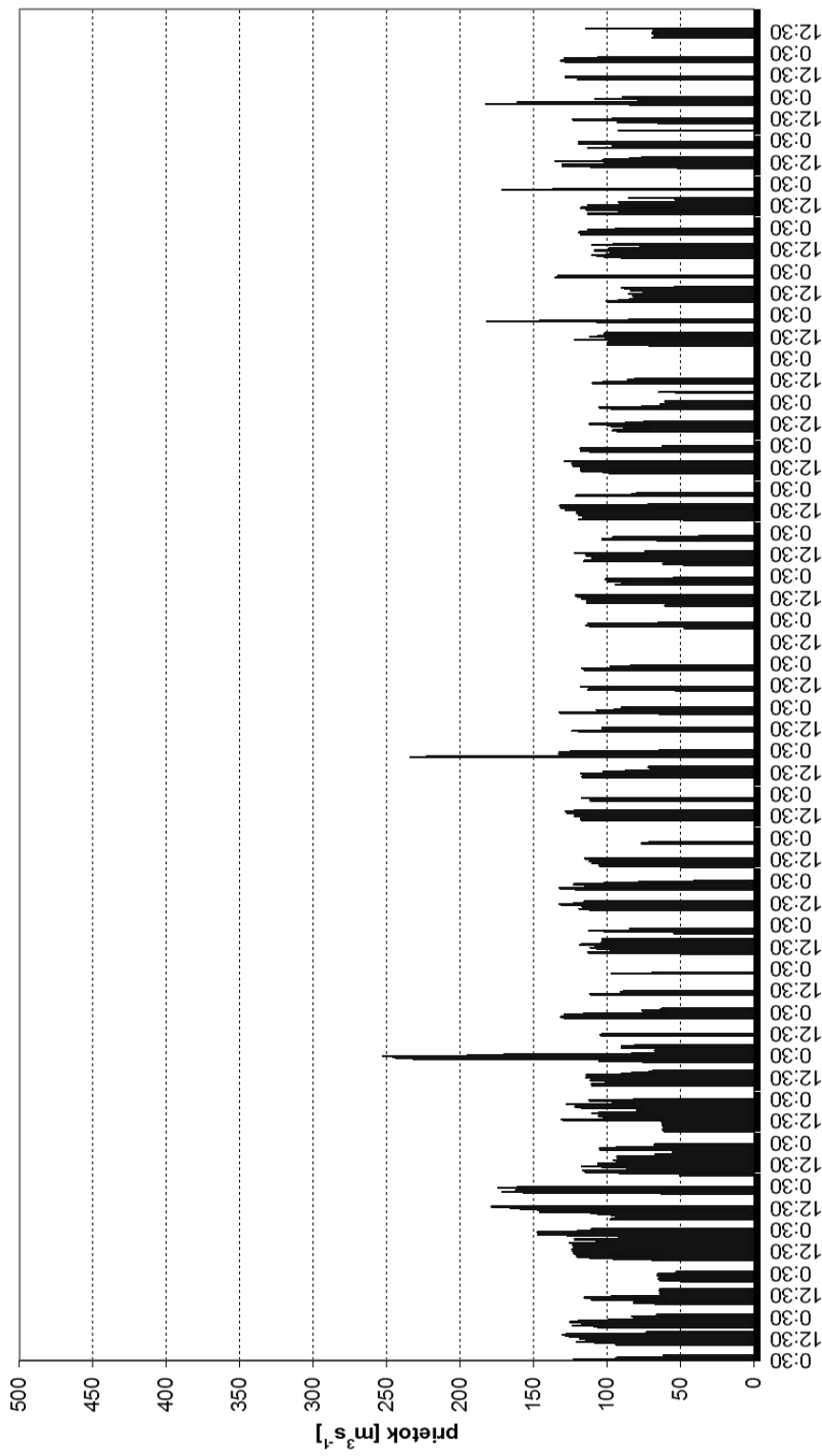




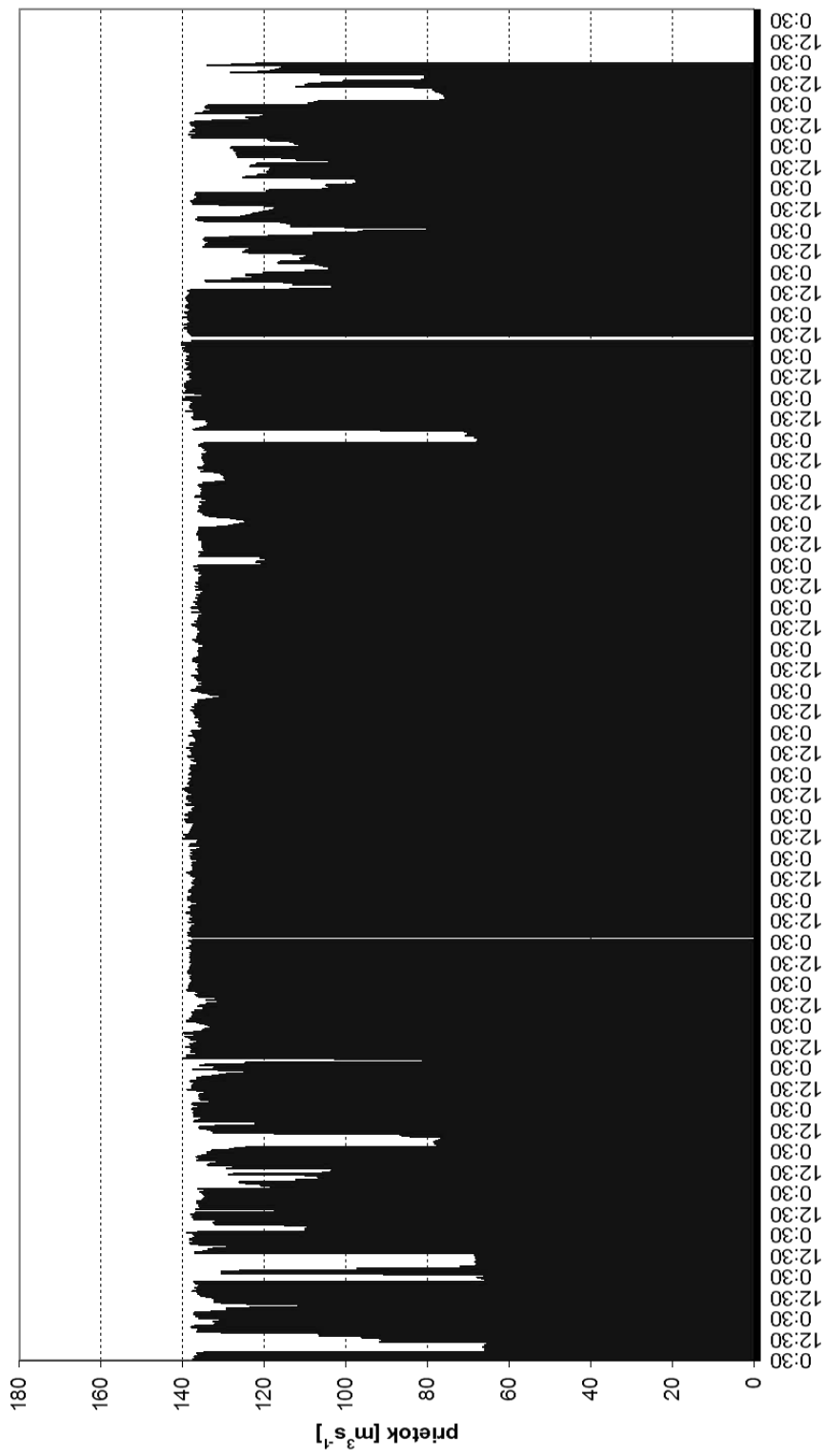
VE Hričov – výpis prietokov z polhodinového protokolu - január 1998



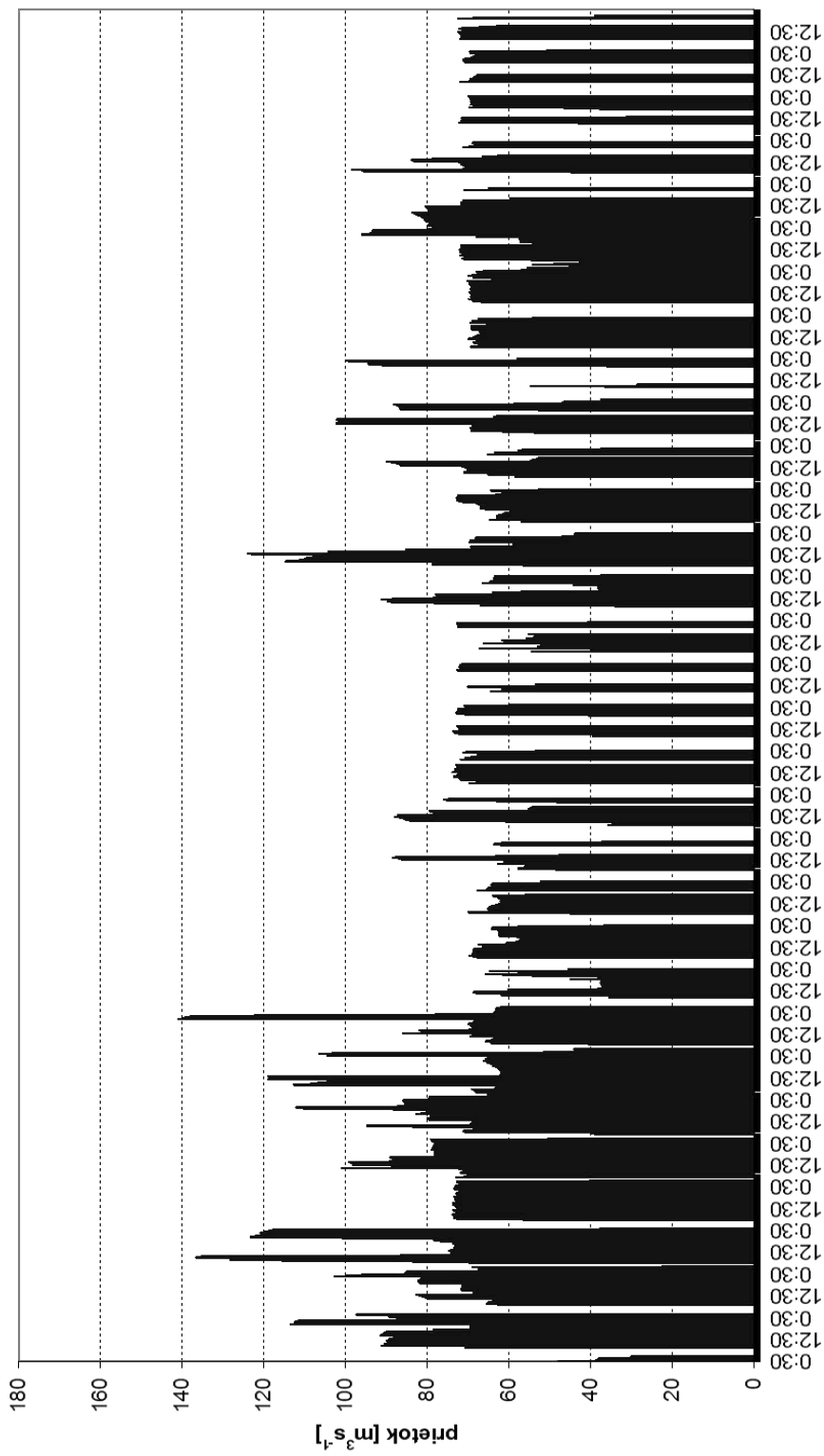
VE Hričov – výpis prietokov z polhodinového protokolu - august 1998



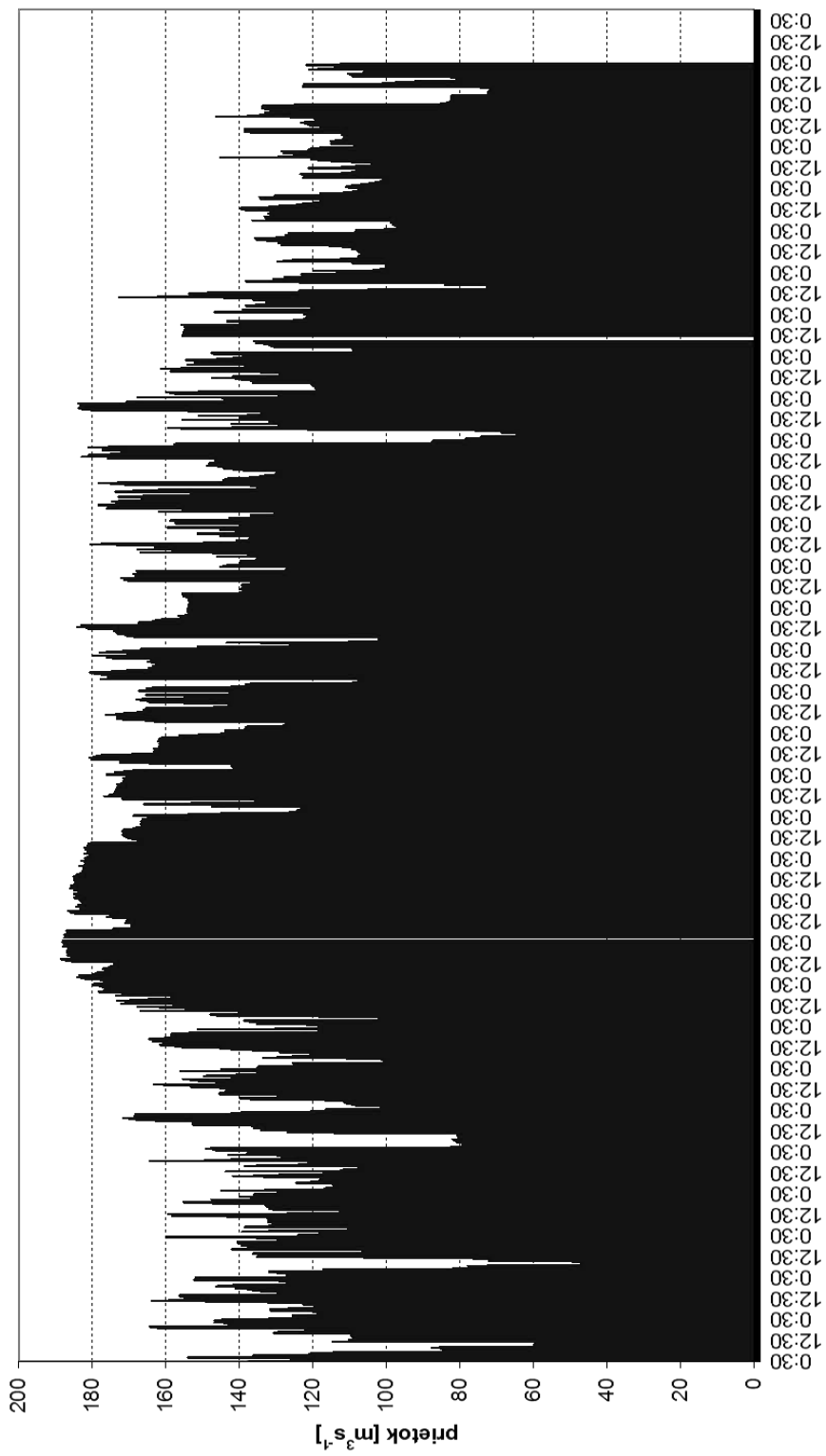
VE Ladce – výpis prietokov z polhodinového protokolu - január 1998



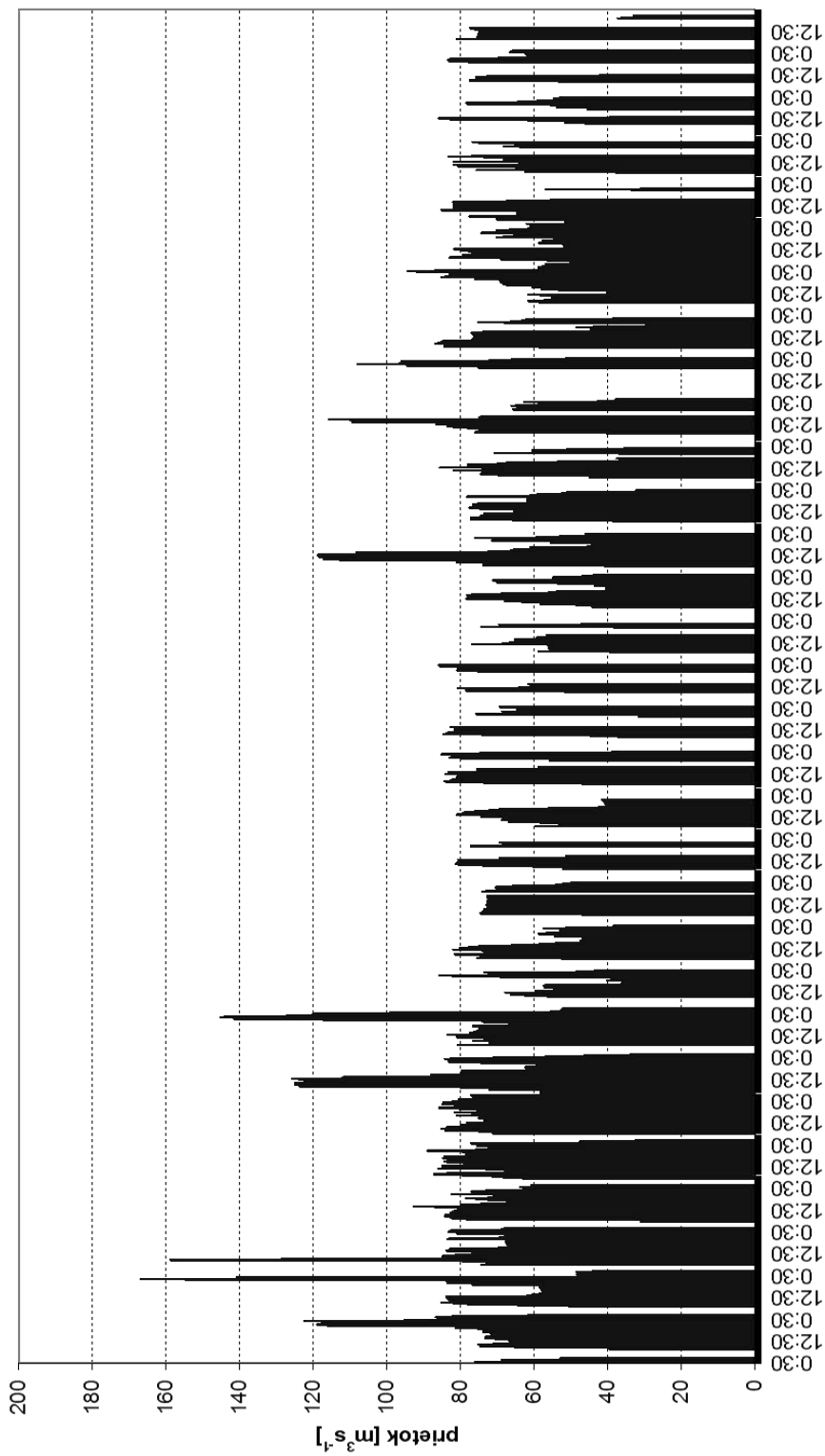
VE Ladce – výpis prietokov z polhodinového protokolu - august 1998



VE Kostolná – výpis prietokov z polhodinového protokolu - január 1998



VE Kostolná – výpis prietokov z polhodinového protokolu - august 1998



## **5 FAKTORY ZVYŠUJÚCE ENERGETICKÉ STRATY NA DERIVAČNÝCH KANÁLOCH**

### **5.1 PRÍČINY VZNIKU LOKÁLNYCH ENERGETICKÝCH STRÁT NA DERIVAČNÝCH KANÁLOCH**

#### **5.1.1 Skupina derivačných kanálov Dolné Kočkovce – Ladce – Ilava – Trenčín**

Sústavy derivačných kanálov sa vypúšťajú spravidla každých 10 rokov pre revíziu stavu derivačného kanála, jeho vyčistenie a opravy, zabezpečujúce funkciu derivačného kanála.

Súbor fotografií je zo septembra roku 2000, keď boli derivačné kanály vypustené a bola realizovaná ich revízia, odstránenie nánosov a oprava poškodených stien derivačných kanálov.

Lokálne straty môžu spôsobovať:

- veľké cudzorodé predmety, napr. potopené automobily (obr. 5.1 – 5.2) pochádzajúce prevažne z trestnej činnosti,
- lokálne nánosy sedimentov (obr. 5.3),
- lokálne poškodené brehy kanálov, pri OK sú to rozobrané opevnenia brehov (obr. 5.4),
- lokálne nakumulovanie kamenného opevnenia dna pod VE alebo brehov OK (obr. 5.5) pri transformovaní časti povodňových prietokov cez VE.

Na dosiahnutie potrebného hydraulického spádu na VE sú časti derivačných kanálov umiestnené vysoko nad okolitým terénom. Lokálne opravy porušeného betónového tesnenia PK (obr. 5.6) slúžia na zamedzenie priesakov z derivačného kanála do svahu kanála, ktoré by mohli spôsobiť porušenie a následnú deštrukciu svahu.



*Obr. 5.1. Prekážka (automobil) v odpadovom kanáli – zvýšené lokálne straty*



*Obr. 5.2. Prekážka (mikrobus) v odpadovom kanáli – zvýšené lokálne straty*





*Obr. 5.3. Lokálne nánosy sedimentov v prívodnom kanáli k VE*



*Obr. 5.4. Lokálne rozobrané kamenné opevnenie brehu*



*Obr. 5.5. Zníženie prietocnej kapacity a transformačného účinku dolnej zdrže VE*



*Obr. 5.6. Poškodenie tesnenia betónového povrchu PK*

## 5.2 PRÍČINY VZNIKU POZDĹŽNYCH ENERGETICKÝCH STRÁT NA DERIVAČNÝCH KANÁLOCH

V podmienkach Vodných elektrární bol výskyt kopýtka prirasteného (opis ulitníka pozri nižšie) prvýkrát zaznamenaný v roku 2000, keď sa vyskytli problémy pri hradení na VE Kráľová. Masívne prichytávanie kolónií lastúrnika spôsobuje ohrozenie bezpečnosti prevádzky VE – hlavne na betónových a kovových konštrukciách v priestore vedenia hradidlových tabúl a špirály turbíny, čím nielen zužujú prietochový profil, ale vzniká reálne nebezpečenstvo havarijného stavu, keď v prípade potreby nie je možné spustiť hradidlovej tabule a uzavrieť vtokový, ale aj výtokový objekt VE. V roku 2005 bol pri vypustení takmer súvisle kopýtkami zanesený Biskupický derivačný kanál. V tom istom roku boli zaznamenané aj problémy pri hradení TG1 (turbo-generátor) na VE Nosice. Výskyt kopýtka bol zaznamenaný aj v Kočkovskom derivačnom kanále v roku 2006.

Výskyt kopýtka na Váhu úzko súvisí s budovaním čistiarní odpadových vôd pozdĺž jeho toku, a tým s odbúravaním organického odpadu a jeho mineralizáciou v čistiarniach. Týmto sa vytvárajú priaznivé podmienky pre rozvoj fyto-planktónu, ktorý slúži ako zdroj potravy pre zooplanktón, ktorým sa živí kopýtko.

Neželaným dopadom pokrytia betónových konštrukcií korýtkom prirasteným je zvýšenie drsnosti dna prívodných kanálov až na úroveň odpadných kanálov (súčiniteľ drsnosti stúpol z  $n = 0,016$  na  $0,025$ ) s následným poklesom hydraulického spádu na VE.

### **Kopýtko prirastené *Dreissena polymorpha* (obr. 5.7)**

Na nohe má žľazy, ktoré vylučujú lepivé blysové vlákna, ktorými sa kopýtko prichytáva na pevnú podložku.

Keď larva dosiahne veľkosť 350 mikrometrov, prichytí sa pomocou výlučkov blysových žliaz na pevnú podložku. Toto prichytenie je také pevné, že skôr sa pretrhne sval spájajúci polovicu mušle, ako by sa kopýtko odtrhlo od podkladu. Kopýtko migruje prostredníctvom rýb, lodnou prepravou štrku (medzi kontinentmi, resp. veľkými jazerami), alebo prichytené na trupoch lodí – od menších jazier vo vnútrozemí, prípadne sťahovavými vtákmi.



*Obr. 5.7. Kopýtko prirastené*

Na obr. 5.8 je ukážka pokrytia betónových konštrukcií v blízkosti VE. Kopýtko bolo odstránené zo dna prírodného kanála. Na ostatných častiach betónových konštrukcií bolo ponechané – nemá podstatný vplyv na energetické straty v derivačnom kanáli pre zanedbateľnú pokrytú plochu. Ručné čistenie tlakovou pištoľou (obr. 5.9) je málo efektívne.



*Obr. 5.8. Ukážka pokrytia betónových konštrukcií ulitníkom  
(nedobudovaná časť plavebnej komory nad VE)*



*Obr. 5.9. Odstraňovanie ulitníka z betónového tesnenia kanála tlakovou vodnou pištoľou*



*Obr. 5.10. Neodstránené kopýtko z odvodňovacej drážky veľkého PK*

## **6 PRÍKLAD APLIKÁCIE VÝSLEDKOV HYDRAULICKÉHO VÝSKUMU KANÁLOVÝCH VE VÁŽSKEJ KASKÁDY**

Ďalej sú uvedené vybrané technické parametre skupín kanálových VE Vážskej kaskády, ktoré majú vplyv na riešenie problematiky a na vytvorenie hydrodynamického modelu. Zároveň v zmysle manipulačných poriadkov je uvedený aj účel (funkcie) týchto vodných stavieb (VS) vrátane vodných elektrární.

Príslušné technické parametre sú členené podľa skupín VE (VS) na:

1. VS Krpeľany – Sučany – Lipovec,
2. VS Hričov – Mikšová I – Považská Bystrica,
3. VS Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín,
4. VS Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda,
5. VS Drahovce – Madunice.

### **6.1 VS KRPEĽANY – SUČANY – LIPOVEC**

#### **6.1.1 Účel VS**

- a) vzduťím Váhu vytvoriť zásobný objem pre energetické využitie vody na VE Krpeľany, Sučany, Lipovec,
- b) účelom derivačného kanála je priviesť vodu k VE a umožniť prípadné ďalšie hospodárne využitie vody, odvedenie časti veľkých vôd Váhu mimo jeho koryta,
- c) lokálna plavba.

Celková dĺžka derivácie je 17, 200 km.

Rozmiestnenie stupňov:

- km 0,0 – VE Krpeľany,
- km 8,715 – VE Sučany,
- km 15,692 – VE Lipovec,
- km 17,1955 – zaústenie odpadového kanála od VE Lipovec do Váhu.

### 6.1.2 Údaje o VE Krpeľany – Sučany – Lipovec

Tabuľka 6.1

	VE Krpeľany		VE Sučany		VE Lipovec	
	nad VE	pod VE	nad VE	pod VE	nad VE	pod VE
Hodnoty odčítane z manipulačného poriadku VD	Maxim. prevádz. hladina [m n. m.]	425,35	411,43	410,90	390,35	372,62
	Minim. prevádz. hladina [m n. m.]	421,35	409,86	409,70	389,15	371,83
	úsek	VE Krpeľany-VE Sučany		VE Sučany-VE Lipovec		
	Maxim. hydrostat. hladina [m n. m.]		410,90		390,35	372,62
	Minim. hydrostat. hladina [m n. m.]		409,70		389,05	371,83
			OK	PK	OK	PK
Hladinový režim	Horná vlnová hranica [m n. m.]		411,63	411,56	391,32	391,00
	Dolná vlnová hranica [m n. m.]		409,51	-	388,12	-
parametre VE	Hĺtkosť VE [m <sup>3</sup> /s]:	3 x 70 = 210		3 x 70 = 210		3 x 70 = 210
	obtoky	jalový priepad b=12 m		jalový priepad b=12 m		jalový priepad b=12 m
	uzáver obtokov	segment		klapka		klapka
	max. kapacita [m <sup>3</sup> /s]	210		210		210

### 6.1.3 Údaje o derivačnom kanáli skupiny VE Krpeľany – Sučany – Lipovec

Tabuľka 6.2

Medzikanál		VE Krpeľany - VE Sučany	
Úsek medzikanála		odpadový	prívodný
Typ omočeného obvodu		betón + štrk	betón
Kóta dna: začiatok - koniec		405,85 - 405,57	405,57 - 404,50
Kóta koruny hrádze	[m n. m.]	nie je	nie je
Dĺžka	[m]	1 405	7 165
Šírka v dne	[m]	25	17
Sklon svahov 1:		3	2
Pozdĺžny sklon priemerný	[‰]	0,200	0,150

Medzikanál		VE Lipovec - staré koryto Váhu	
Úsek medzikanála		odpadový	prívodný
Typ omočeného obvodu		betón	nie je
Kóta dna: začiatok - koniec		368,24 - 367,94 (prah)	nie je
Kóta koruny hrádze	[m n. m.]	nie je	nie je
Dĺžka	[m]	1 520	nie je
Šírka v dne	[m]	20	nie je
Sklon svahov 1:		3	nie je
Pozdĺžny sklon priemerný	[‰]	0,200	nie je

Medzikanál		VE Sučany - VE Lipovec	
Úsek medzikanála		odpadový	prívodný
Typ omočeného obvodu		kameň + betón	betón
Kóta dna: začiatok - koniec		384,55 - 384,48	384,48 - 383,24
Kóta koruny hrádze	[m n. m.]	nie je	392,37
Dĺžka	[m]	396	6 536
Šírka v dne	[m]	11	17
Sklon svahov 1:		3	2
Pozdĺžny sklon priemerný	[‰]	0,190	0,190

## 6.2 STANOVENIE HYDRAULICKEJ CHARAKTERISTIKY – STUPŇA DRSNOSTI OMOČENÉHO OBVODU

Na základe údajov získaných meraniami „in situ“ (pozri predchádzajúcu kapitolu) boli podľa Metodiky overovania súčiniteľa drsnosti derivačných kanálov (pozri kapitolu 3.4) stanovené súčinitele drsnosti derivačných kanálov – vždy zvlášť pre prívodnú a odpadovú časť. Členenie výsledkov je podľa časového potupu meraní po skupinách VE na:

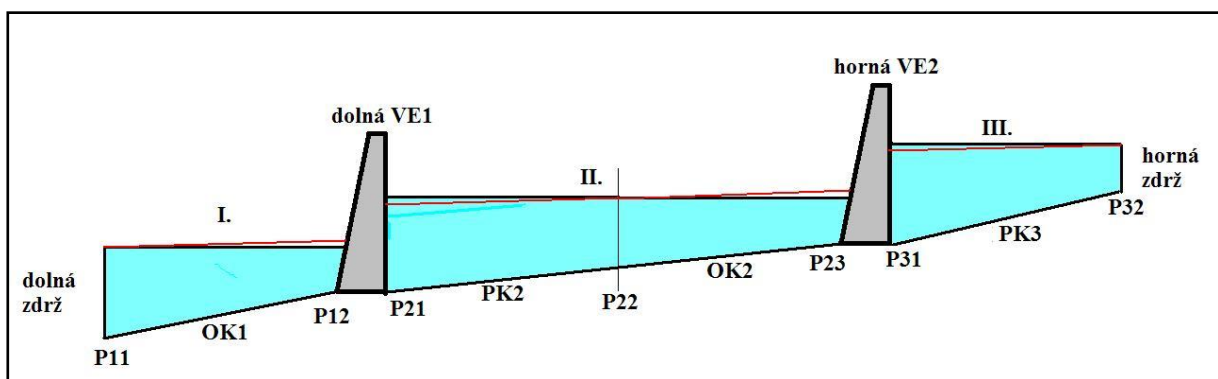
rok 2006      skupina VE Krpeľany – Sučany – Lipovec a  
                  skupina VE Hričov – Mikšová – Považská Bystrica,



rok 2005 skupina VE Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín a  
 skupina VE Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda,  
 rok 2004 VE Madunice.

Na obr. 6.1 je znázornené schematické rozdelenie všetkých druhov derivačných kanálov na časti prívodný a odpadový kanál:

- I. kanál dolná zdrž – posledná VE zo skupiny – iba časť odpadový kanál,
- II. medzikanál medzi dvoma VE – obidve časti – odpadový aj prívodný kanál,
- III. kanál horná zdrž – prvá VE zo skupiny – iba časť prívodný kanál.



Obr. 6.1. Ilustračná schéma rozdelenia derivačných kanálov na jednotlivé časti

kde VE1, VE2 sú kanálové vodné elektrárne,  
 $P_{ij}$  – význačné profily derivačných kanálov,  $i$  – číslo úseku,  $j$  – číslo profilu v úseku,  
 $PK_i$  – prívodná časť kanála  $i$ -tého úseku,  
 $OK_i$  – odpadová časť kanála  $i$ -tého úseku.

### 6.3 SKUPINA VE KRPEĽANY – SUČANY – LIPOVEC

Pre aplikáciu výsledkov v roku 2006 boli zvolené 2 skupiny VE:

1. Krpeľany – Sučany – Lipovec,
2. Hričov – Mikšová I – Považská Bystrica.

Pre výpočet hydraulických charakteristík boli zvolené merania ustálených hladín (podklady pre jednotlivé úseky sú uvedené na grafoch v prílohách). Pri neustálených hladinách boli použité vyrovnané trendové krivky medzi meraniami. Výsledky výpočtov boli spracované do tabuliek, ktoré sú uvedené v ďalšom.

Kanály VE boli rozdelené pre potreby výpočtu na časť prívodných kanálov (PK) a odpadových kanálov (OK) so stanovením ich priemerných geometrických charakteristík.

Grafické spracovanie meraní hladín na posúdenie dodržania požadovaných scenárov prietokov (údaje podľa prevádzkovateľa Vodných elektrární Trenčín) spolu s nameranými hladinami (údaje Katedry hydrotechniky SvF STU) je na grafoch v prílohovej časti (1 – 3).

V ďalšom sú uvedené výsledky výpočtov v tabuľkovej forme a komentáre.

Spoločný komentár si vyžaduje iba spôsob merania prietoku  $Q$  turbínou. Prietok sa nemeria priamo ale sa dopočítava zo vzťahu pre elektrický výkon:

$$P = 9,81 \cdot Q_t \cdot H_c \cdot \eta \quad (6.1)$$

kde  $Q_t$  je turbínový prietok,  
 $H_c$  – čistý spád vody na VE,  
 $\eta$  – celková účinnosť premeny vodnej energie na elektrickú energiu.

Zo vzťahu 6.1 môžeme vypočítať  $Q_t$  podľa vzťahu

$$Q_t = \frac{P}{9,81 \cdot \eta \cdot H_c} \quad (6.2)$$

Celková účinnosť premeny sa stanovuje pri garančných meraniach, a teda v takmer ideálnych podmienkach. Jej reálna hodnota býva nižšia a to hlavne vplyvom narastajúcich hydraulických strát napr. zanášaním vstupného objektu na VE. Z uvedeného dôvodu vypočítaný prietok vody z elektrického výkonu je menší, ako skutočný.

### 6.3.1 Úsek Krpeľany – Sučany

Tabuľka 6.3

Medzikanál		VE Krpeľany – VE Sučany	
Úsek medzikanála		odpadový	prívodný
Kóta dna: začiatok – koniec	[ m n.m.]	405,61–406,41	404,12–405,61
Dĺžka	[ m]	1 390	7 325
Šírka v dne	[ m]	25	17
Sklon svahov	1 :	2,75	2,25

#### Odpadový kanál

Dátum merania		15. 8. 2006
Hodina výpočtu		12:00
Dolný profil, hladina	m n. m.	410,24
Horný profil, hladina	m n. m.	410,32
Priemerný prietok	m <sup>3</sup> /s	95
Drsnosť dna		<b>0,0285</b>

#### Prívodný kanál

Dátum merania		15. 8. 2006
Hodina výpočtu		12:00
Dolný profil, hladina	m n. m.	410,20
Horný profil, hladina	m n. m.	410,31
Priemerný prietok	m <sup>3</sup> /s	95
Drsnosť dna		<b>0,0163</b>

#### **Poznámky k meraniu a k výpočtom:**

##### **Odpadový kanál VE Krpeľany 15. 8. 2006**

Vypočítaný koeficient drsnosti kanála je nepatrne zvýšený nad hodnotu vykazujúcu dobrý stav odpadového kanála. Vyššia odchýlka od strednej hodnoty pre výpočet pri prietoku 95 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> je daná presnosťou merania hladiny na centimetre, čo vedie pri nízkych rozdieloch hladín k zvýšeniu chyby výpočtu. Nízky prietok má malý stabilizačný účinok. Udávaný rovnaký prietok cez obidve VE medzi 9 a 11 hodinou viedol k „vyčerpávaniu“ kanála, čo je nelogické. Chyba v prietokoch je asi 10 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (pozri hodnoty okolo 12 hod).

##### **Prívodný kanál VE Sučany 15. 8.2006**

Vypočítaný koeficient drsnosti kanála je nepatrne zvýšený nad hodnotu vykazujúcu dobrý stav prívodného kanála. Vyššia odchýlka od strednej hodnoty pre výpočet pri prietoku 95 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> je

daná presnosťou merania hladiny na centimetre, čo vedie pri nízkych rozdieloch hladín k zvýšeniu chyby výpočtu. Nízky prietok má malý stabilizačný účinok. Udávaný rovnaký prietok cez obidve VE medzi 9 a 11 hodinou viedol k „vyčerpávaniu“ kanála, čo je nelogické. Chyba v prietokoch je asi  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (pozri hodnoty okolo 12 hod).

### 6.3.2 Úsek Sučany – Lipovec

Tabuľka 6.4

Medzikanál		VE Sučany – VE Lipovec	
Úsek medzikanála		odpadový	prívodný
Kóta dna: začiatok – koniec	[ m n. m.]	x	382.83–384.61
Dĺžka	[ m]	x	6 997
Šírka v dne	[ m]	x	17
Sklon svahov	1 :	x	2

**Medzikanál ako celok** (odpadový kanál je veľmi krátky)

Dátum merania		15. 8. 2006
Hodina výpočtu		11:00
Dolný profil, hladina	m n.m.	390,07
Horný profil, hladina	m n.m.	390,12
Priemerný prietok	$\text{m}^3/\text{s}$	95
Drsnosť dna		<b>0,0155</b>

**Poznámky k meraniu a výpočtom:**

**Medzikanál VE Sučany – VE Lipovec 15. 8. 2006**

Odpadový kanál VE Sučany je veľmi krátky. Podľa manipulačného poriadku má dĺžku iba 396 m, pričom celková dĺžka medzikanála Sučany – Lipovec je takmer 7 km. Naviac hladinová sonda medzi odpadovým a prívodným kanálom počas merania vypadla. Z tohto dôvodu sa tento úsek vyhodnocoval ako celok s priemernou drsnosťou dna celého medzikanála. Vypočítaný koeficient drsnosti kanála zodpovedá dobrému prevádzkovému stavu. To potvrdila aj optická kontrola meraného úseku.

### 6.3.3 Úsek Lipovec odpadový kanál

Tabuľka 6.5

Medzikanál		VE Lipovec – odpadový kanál	
Úsek medzikanála		odpadový	prívodný
Kóta dna: začiatok – koniec	[ m n.m.]	367,57–367.84	x
Dĺžka	[ m]	1 508	x
Šírka v dne	[ m]	20	x
Sklon svahov 1 :		2,5	x

#### Odpadový kanál

Dátum merania		15.8.2006
Hodina výpočtu		11:00
Dolný profil, hladina	m n. m.	371,99
Horný profil, hladina	m n. m.	372,05
Priemerný prietok	m <sup>3</sup> /s	95
Drsnosť dna		<b>0,0264</b>

#### *Poznámky k meraniu a výpočtom:*

#### *Odpadový kanál VE Lipovec 15. 8. 2006*

*Vypočítaný koeficient drsnosti odpadového kanála zodpovedá dobrému prevádzkovému stavu kanála.*

## 7 ZÁVER

Možnosti prevádzky kanálových vodných elektrární a stupeň účinnosti premeny hydroenergetického potenciálu z veľkej miery závisia od konštrukčného vyhotovenia derivačných kanálov a ich stavu – najmä kvality povrchu omočeného obvodu. Preto k možnostiam zefektívnenia ich prevádzky patrí aj výskum prúdenia vody v derivačných kanáloch. Na Katedre hydrotechniky SvF STU bol vyvinutý hydrodynamický model prúdenia vody v derivačných kanáloch VE Vážskej kaskády. Tento model bol pre potreby ďalšieho použitia kalibrovaný a verifikovaný na základe meraní „in situ“ – t. j. meraní hladinového režimu priamo v teréne pri rôznych spôsoboch prevádzky.

Merania na VD Drahovce – Madunice umožnilo dopracovať metodiku určovania hydraulických charakteristík derivačných kanálov. Správne stanovenie súčiniteľa drsnosti derivačného kanála je nevyhnutné pre skvalitnenie výstupov z HDM.

Pri ďalšom riešení odporúčame zamerať pozornosť na:

- modelovanie interakcie prírodných kanálov a horných vyrovnávacích nádrží, modelovať vplyv zníženia prietoku vplyvom zanesenia čistiacich hrablíc,
- modelovanie interakcie odpadných kanálov a dolných vyrovnávacích nádrží, prípadne zaústenia derivačného kanála s prírodným korytom,
- výpočet korekčného faktora pre odvodenie veľkosti prietoku  $Q$  z údajov o generovanom výkone  $P$  pri nesymetrickej prevádzke na derivačnom kanáli,
- modelovanie zvýšenej hodnoty koeficientu nerovnomerného rozdelenia rýchlosti vody v profile v oblúkoch derivačných kanálov (doposiaľ sa neuvažuje),
- modelovanie vplyvu vetra na vlnový režim vody v derivačnom kanáli hlavne v dlhých kanáloch (vplyv vetra sa zanedbáva),
- modelovanie vplyvu zanesenia profilu plaveninami pred plavebnou komorou nad VE na dynamiku nábehu a odstavenia VE z prevádzky (pri výpočtoch sa vychádza z projekčných údajov, zanesenie plaveninami nie je zamerané).

K skvalitneniu modelu by prispela integrácia prírodného koryta Váhu do matematického modelu, čo by umožnilo jeho využitie aj pri modelovaní situácií so zvýšeným až povodňovým prietokom.

V tejto práci boli zhrnuté poznatky z výskumných projektov Katedry hydrotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave najmä z obdobia rokov 1998 až 2010. Projekty sa týkali výskumu na kanálových VE Vážskej kaskády:

1. Krpeľany – Sučany – Lipovec,
2. Hričov – Mikšová I – Považská Bystrica,
3. Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín,
4. Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda,
5. Drahovce – Madunice.

Okrem vytvorenia hydrodynamického modelu prúdenia vody v derivačných kanáloch VE Vážskej kaskády boli získané aj dlhšie poznatky o hydraulickom stave a prevádzke jednotlivých skupín VE.

## 8 LITERATÚRA

### 8.1 PRÍSPEVKY V ZBORNÍKOCH

#### 8.1.1 Domáce konferencie

DUŠIČKA, P. – KVĚTON, R.: Aplikácia 1–D modelovania v procese riadenia kanálových vodných elektrární Vážskej kaskády. In: Zborník medzinárodnej konferencie o vodnej energetike HYDROTURBO 2001, Podbanské, 2001, s. 335 – 340

DUŠIČKA, P. – KVĚTON, R. – KVĚTON, B.: Aplikácia 1–D modelovania v procese riadenia kanálových vodných elektrární Vážskej kaskády. In: Zborník 4.-tej konferencie s medzinárodnou účasťou Environmentálne aspekty navrhovania a prevádzky nádrží a priehrad a Vplyv vodohospodárskych stavieb na tvorbu a ochranu životného prostredia, Podbanské, 2001, s. 259 – 266

DUŠIČKA, P. – KVĚTON, R.: Hydrodynamický model VE Gabčíkovo. In: Medzinárodná konferencia 10 rokov prevádzky VE Gabčíkovo, Gabčíkovo, 2002, s. 285 – 291

KVĚTON, R.: Matematický model VE Madunice, Zborník z konferencie (CD) s medzinárodnou účasťou „Hydrológia na prahu 21. storočia – Vízie a realita“ organizovanej ÚH SAV, SVH a SV IGBP, Smolenický zámok, 2003

KVĚTON, R. – DUŠIČKA, P.: Mathematical Model of Water Work Drahovce – Madunice. In: Proceedings of VIII. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Podbanské, 2003, s. 227 – 234

KVĚTON, R. – DUŠIČKA, P. – a kol.: Terénne merania a kalibrácia hydrodynamického modelu VD Drahovce – Madunice. In: Zborník konferencie s medzinárodnou účasťou Vplyv vodohospodárskych stavieb na tvorbu a ochranu životného prostredia, Podbanské, 2005, s. 267 – 276

#### 8.1.2 Zahraničné konferencie

DUŠIČKA, P. – KVĚTON, R. – KVĚTON, B.: Application of 1–D Modeling in the Process Operating the Channel Power Plants of the Vah Cascade. In: Proceedings of the



VII International Symposium of Water Management and Hydraulic Engineering, Medzybrodzie Zywiecke, Poland, 2001, pp. 71 – 78

DUŠIČKA, P. – KVĚTON, R.: 1–D Modeling in the Process Operating the Channel Power Plants – Theory, Application and Results. In: Advances in Hydro – Science and – Engineering, Warsaw, Poland, 2002, CD ROM

DUŠIČKA, P. – KVĚTON, R.: Využitie hydrodynamického modelovania pri prevádzke VE Gabčíkovo. In: II. vodohospodárské kolokvium, Brno, 2002, s. 43 – 48

KVĚTON, R. – DUŠIČKA, P.: Mathematical Model of Water Work Drahovce – Madunice. In: Zborník Medzinárodného kolokvia v rámci 4. vodohospodárskej konferencie, Brno, 2004, pp. 12 – 17

KVĚTON, R. – DUŠIČKA, P.: Terrain Measurements and Calibration of Hydro Dynamical Model of Water Work Drahovce – Madunice. In: Proc. Ninth International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ottenstein, Austria, 2005, pp. 229 – 238

KVĚTON, R., DUŠIČKA, P., RUMANN, J.: Terrain Measurements and Calibration of Hydro Dynamical Model of Groups of Channel Hydro Power Plants on the Váh Cascade. In: Book of Abstracts and Proceeding of 10 th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering on CD, Šibenik, Croatia 2007, s. 187

## 8.2 Články v časopisoch

KVĚTON, R.: Matematický model VE Madunice, Acta Hydrologica Slovaca, ročník 4, č. 2, 2003, str. 282 – 287, vydavateľstvo SAV

Květon, R., Dušička, P.: Hydro–Dynamic Model of Groups of Ladce – Ilava – Dubnica – Trenčín and Kostolná – Nové Mesto – Horná Streda Channel Hydro Power Plants. Slovak Journal of Civil Engineering, Vol.XVI/4/2008, Bratislava, Slovak University of Technology, 33 – 39 p., ISSN 1210–3896

## 8.3 Projekty

APVT–20–046302 Výskum regulačnej prevádzky kanálových vodných elektrární – hydrodynamický model (2004 až 2006)

APVV–0680–10 Transformácia prietokových vln na úsekoch bez priamej hydraulickej väzby u vodohospodársko-energetických sústav (2011 až 2014)

#### 8.4 Citovaná literatúra

- [1] Dušička, P. – Květon, R. – Květon, B.: Application of 1–D Modeling in the Process Operating the Channel Power Plants of the Vah Cascade. In: Proceedings of the VII International Symposium of Water Management and Hydraulic Engineering, Medzybrodzie Zywiecke, Poland, 2001, pp. 71 – 78
- [2] Dušička, P. – Květon, R.: 1–D Modeling in the Process Operating the Channel Power Plants – Theory, Application and Results. In: Advances in Hydro – Science and – Engineering, Warsaw, Poland, 2002, CD ROM
- [3] Gabriel, P. – Hartoň, W.: Výskum hydraulického režimu derivačných kanálov Vážskej kaskády pri špičkovaní, záverečná správa B–PÚ–104, VÚVH Bratislava 1971
- [4] Květon, R. – Dušička, P.: Mathematical Model of Water Work Drahovce – Madunice, VIII. International Symposium on Water management and hydraulic engineering, pp. 227 – 234, Podbanské, Slovakia, 2003
- [5] Květon, R. – Dušička, P.: Terrain Measurements and Calibration of Hydro Dynamical Model of Water Work Drahovce – Madunice. In: Proc. Ninth International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ottenstein, Austria, 2005, pp. 229 – 238
- [6] Květon, R.: Matematický model VE Madunice, Acta Hydrologica Slovaca, ročník 4, č. 2, 2003, str. 282 – 287, vydavateľstvo SAV
- [7] Květon, R.: VD Hričov zvýšenie hladiny – technická štúdia – Hydraulické posúdenie, ETIRS, Bratislava 2004
- [8] Lopez, J. L.: Mathematical modeling of sediment deposition in reservoirs, Hydrology Papers, Colorado State University, 1978
- [9] Szymkiewicz, R.: Modelowanie matematyczne przeplywow w rzekach i kanalach, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000
- [10] SOBEK River/Estuary – User Manual, WL / Delft Hydraulics, 2000

## 9 GRAFICKÉ PRÍLOHY

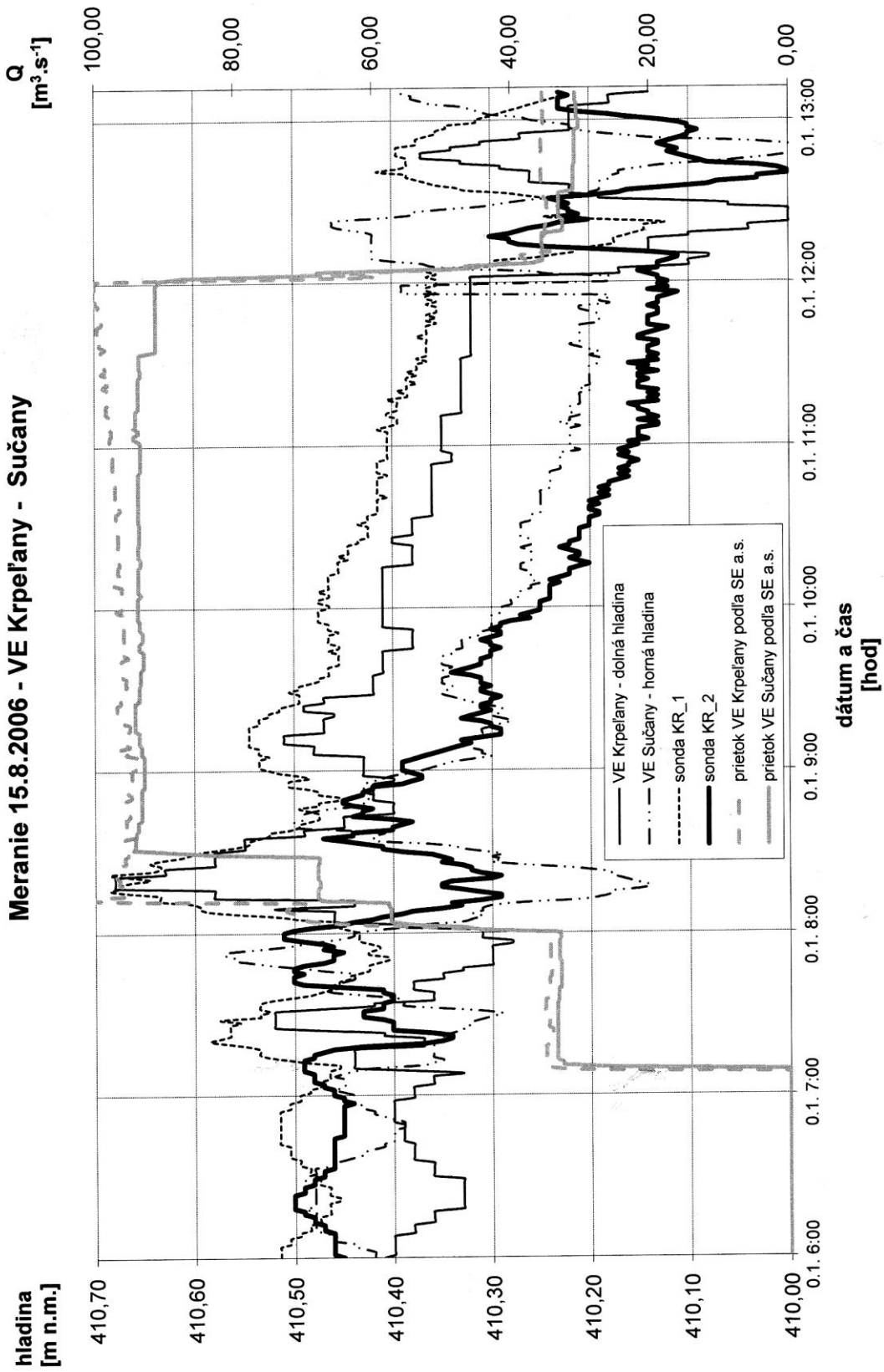
### Meranie 2006

Grafické spracovanie meraní hladín na posúdenie dodržania požadovaných scenárov prietokov (údaje podľa prevádzkovateľa Vodných elektrární Trenčín) spolu s nameranými hladinami (údaje Katedry hydrotechniky SvF STU) je na grafoch v prílohovej časti správy.

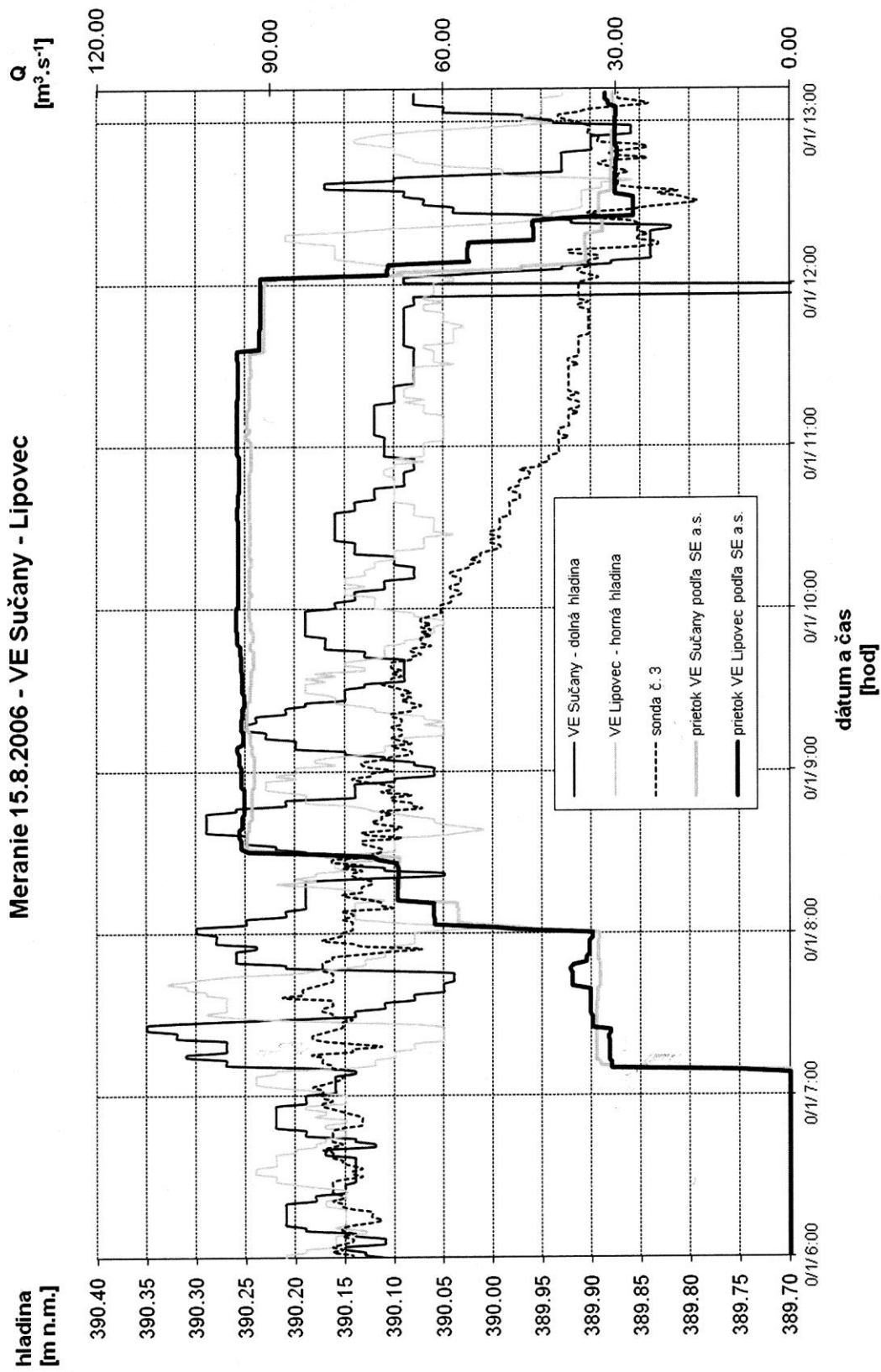
<b>príloha</b>	<b>obsah</b>	<b>popis</b>	<b>dátum merania</b>
1.	meranie	kanál VE Krpeľany – Sučany	15. 8. 2006
2.	meranie	kanál VE Sučany – Lipovec	15. 8. 2006
3.	meranie	OK VE Lipovec	15. 8. 2006

### Postup spracovania nameraných hodnôt:

- Určenie korekčných údajov výšok hladín na základe údajov nameraných v neprietočnom stave kanála s prípadným vyrovnaním na strednú hodnotu (ako vzťažná kóta hladiny sa použil údaj výšky hladiny na začiatku kanála).
- Odčítanie výšok hladín v ustálenom prietočnom stave s prípadným vyrovnaním odstraňujúcim sekundárne vlnenie (nespôsobené vlastnou prietočnou prevádzkou) v kanáli.
- Korekcia údajov z bodu b. na základe údajov z bodu a.
- Určenie drsnostných súčiniteľov na základe údajov z bodu c.



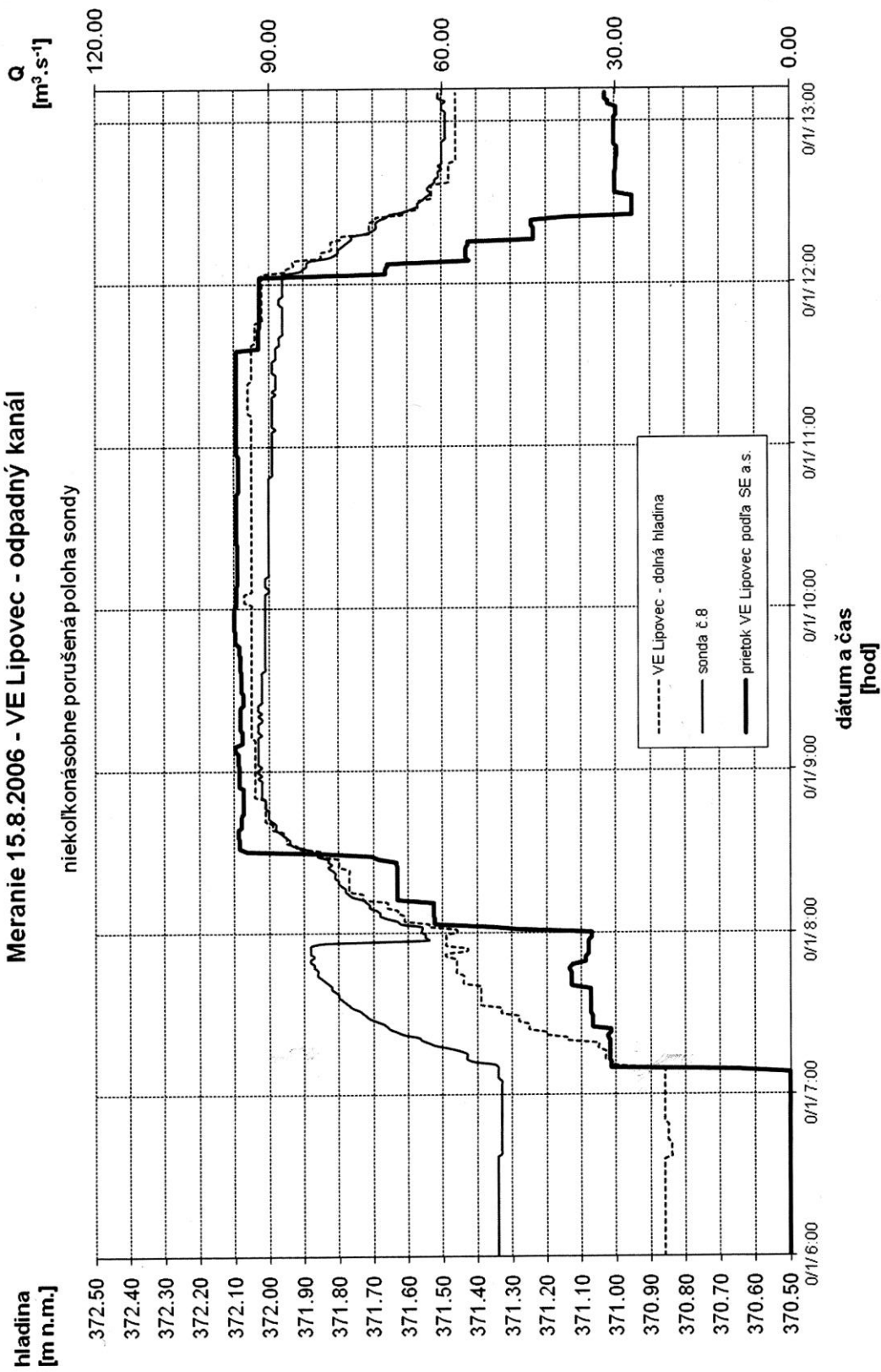
Príloha 1.



Príloha 2.

# Meranie 15.8.2006 - VE Lipovec - odpadný kanál

niekoľkonásobne porušená poloha sondy



## SÚHRN

### Kanálové vodné elektrárne – hydraulický výskum prevádzky derivačných kanálov

#### I. časť – Základný hydraulický výskum

Hydroenergetický potenciál krajiny je národné bohatstvo, ktorého efektívne využitie prostredníctvom vodných elektrární prináša členitým a na vodné zásoby bohatým krajinám, ako je aj Slovensko, podstatnú energetickú výhodu.

Kanálové vodné elektrárne (KVE) sú špecifickým typom vodných elektrární. Možnosti ich prevádzky a stupeň účinnosti premeny celkového hydroenergetického potenciálu z veľkej miery závisí od konštrukčného vyhotovenia derivačného kanála a jeho momentálneho prevádzkového stavu – najmä kvality povrchu jeho omočeného obvodu, ktorá je charakterizovaná parametrom drsnosti kanála.

Jedna z možností, ako dosiahnuť efektívnejšiu prevádzku KVE, je výskum prúdenia vody v derivačných kanáloch pri rôznych režimoch prevádzky KVE. Výsledky výskumu sa dajú použiť na:

- návrh opatrení pre bezpečnú prevádzku pri náhlych zmenách prietoku vody cez KVE,
- návrh možných úprav povrchu derivačných kanálov (prípadne vykonaniu revízie KVE) smerujúcich ku zníženiu hydraulických strát pri bežnej energetickej prevádzke.

Základ pre vznik tejto práce boli poznatky z výskumných projektov vykonávaných Katedrou hydrotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave najmä v období rokov 1998 až 2010, ktorých predmetom bol výskum prevádzky KVE na Vážskej kaskáde.

Nezastupiteľnú úlohu pri modernom výskume prevádzky KVE mal katedrou vyvinutý hydrodynamický model prúdenia vody v derivačných kanáloch. Tento model bol pre potreby ďalšieho použitia kalibrovaný a verifikovaný na základe niekoľkých meraní „in situ“ KVE Vážskej kaskády – t. j. meraní hladinového režimu priamo v teréne pri rôznych spôsoboch prevádzky kanálových vodných elektrární.

Ako najdôležitejšia hydraulická charakteristika už vybudovaných derivačných kanálov bol drsnostný súčiniteľ kanálov stanovený na základe terénneho výskumu.

Prvá časť monografie sa venuje základnému výskumu prevádzky KVE. Poskytuje ucelenú informáciu počnúc charakteristikou KVE, hydraulickými väzbami medzi KVE ich funkciou a končiac matematickým hydrodynamickým modelom KVE s potrebnými fyzikálnymi a matematickými základmi.

V kapitole „Analýza prevádzky skupín KVE“ sú uvedené výsledky overenia reálneho systému fungovania kanálových VE Vážskej kaskády a využívania ich regulačných funkcií.

Ďalším faktorom zvyšujúcim energetické straty na derivačných kanáloch je venovaná samostatná kapitola s bohatou fotodokumentáciou.

Príklad aplikácie výsledkov základného výskumu KVE je uvedený v monografii na skupine KVE Krpeľany – Sučany – Lipovec. Okrem bohatej faktografie o KVE je tu uvedená aj všeobecná metodika stanovenia komplexného stupňa drsnosti omočeného obvodu kanála (zahrňujúceho aj ďalšie faktory spôsobujúce energetické straty) bez potreby dlhodobých zásahov do prevádzky KVE, ako je napríklad vypustenie derivačných kanálov.

Kalibrovanie a verifikovanie hydrodynamického modelu na konkrétny systém KVE umožňuje jeho efektívne použitie pre ďalšie výpočty prúdenia vody v súvislosti s výskumom regulačnej prevádzky kanálových vodných elektrární. Príkladom môže byť zabezpečovanie podporných služieb pre elektrizačnú sústavu alebo aj pre riešenie interakcie regulačnej energetickej prevádzky a pripravovanej plavebnej prevádzky na jednotlivých stupňoch Vážskej kaskády.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV–0680–10.



## SUMMARY

### **Channel water power plants- hydraulic research of diversion channel operation**

#### **I. Part - Basic hydraulic research**

Hydroenergetic resources are a national treasure, which gives to a hilly country with rivers, such as Slovakia, a significant energetic advantage.

Channel water power plants (CHWPP) are a special type of hydroelectric power stations. The type of the power station and its effectiveness in converting the hydroenergetic potential which depends on a large degree on the construction of the diversion channel and its operational state, primarily the quality of the surface of its wetted perimeter, which is characterized by the parameter of channel friction.

One way of increasing the effectiveness of CHWPP is studying water flow in diversion channels at various operation regimes of CHWPP. The result of such studies can be used to:

- suggest rules for safe operation when water discharge through CHWPP suddenly changes
- suggest changes to the surface of diversion channels (or even the CHWPP) that would lower the hydraulic losses in the daily operation.

The basis for this work are the results of research projects at the Department of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, primarily between the years 1998 ~ 2010, which was focused on studying the operation of CHWPP in coordinated hydroelectric system on the river Vah

The hydrodynamic model of water flow in diversion channels, which was developed by our department, played a central role in our studies. This model was calibrated and verified based on several „in situ“ measurements of CHWPP in coordinated hydroelectric system on the river Vah – the measurements of water surface regime during various operation regimes of CHWPP.

The most important hydraulic characterization of already built diversion channels was channel friction coefficient, which was estimated from studying the terrain.

The first part of this book focuses on studying the operation of CHWPP. It provides complete coverage of the problem, starting with characterizing CHWPP, hydraulic laws that

govern them, and ending with a mathematical hydrodynamic model of CHWPP, including the necessary basics in mathematics and physics.

In chapter „Operation analysis of groups CHWPP“, we discuss how our results are applied in practice to CHWPP in coordinated hydroelectric system on the river Vah, including how these results are used to regulate CHWPP.

The next chapter is devoted to describing additional factors that increase energetic losses in diversion channels. This chapter contains a lot of pictures.

The results of our research are applied to CHWPP Krpelany – Sucany – Lipovec. The CHWPP are described in great detail. We also describe in detail our methodology for estimating complex friction coefficient of wetted channel perimeter (including other factors that cause energetic losses) without significantly affecting the operation of CHWPP, such as deflation of diversion channels.

When the hydrodynamic model of a specific CHWPP is properly calibrated and verified, it can be used for many additional purposes, such as calculations of water flow in connection with research of CHWPP controlled operation. One particular example is to support of electricity supply system or to model the interaction between regulating energetic operation and planned navigation on particular stages of in coordinated hydroelectric system on the river Vah.

This work was supported by Slovak Research and Development Agency, project number APVV-0680-10.

## ŽIVOTOPISY AUTOROV

### **Prof. Ing. Peter Dušička, PhD.**

Narodil sa 20. augusta 1962 v Trenčíne. Študoval na Strednej priemyselnej škole stavebnej v Trenčíne (1977 – 1981) v triede so zameraním na dopravné stavby. Štúdium na Stavebnej fakulte Slovenskej vysokej školy technickej v Bratislave absolvoval v odbore Vodné stavby a vodné hospodárstvo a ukončil ho štátnymi skúškami v roku 1986. V diplomovej práci sa venoval problematike prevádzky skupiny kanálových vodných elektrární. Popri štúdiu pracoval aj v š. p. Hydroconsult Bratislava ako asistent projektanta (1985 – 1986) a ako vedecká pomocná sila na Katedre hydrotechniky, kam aj po ukončení štúdia nastúpil do trvalého pracovného pomeru (od 1986) ako odborný asistent. Špecializuje sa najmä na oblasť využitia vodnej energie a vodných stavieb.

V roku 1993 získal titul PhD. v odbore Hydrotechnika, v roku 1997 titul docent a v roku 2007 titul profesor v odbore Vodné stavby. Od roku 2001 je autorizovaným stavebným inžinierom a od roku 2000 vedúcim Katedry hydrotechniky na Stavebnej fakulte STU v Bratislave.

**Pôsobenie v pedagogickej oblasti** – Po nástupe na Katedru hydrotechniky Stavebnej fakulty SVŠT učil predmety Hydraulika, Využitie vodnej energie a Hydroenergetika. V súčasnosti prednáša predmety Využitie vodnej energie a Malé vodné elektrárne. Je garantom študijného programu Vodné stavby a vodné hospodárstvo (bakalársky stupeň) a Stavby na ochranu územia (inžiniersky stupeň).

**Pôsobenie v odbornej a vedeckej oblasti** – Špecializuje sa na problematiku využitia vodnej energie a návrhov vodných stavieb. Je autorom resp. spoluautorom 2 monografií, 3 knižných publikácií a 5 skrípt. Bol zodpovedným riešiteľom 9 výskumných projektov VEGA, VTP a APVV. Ako zodpovedný projektant sa podieľal aj na 9 projektoch vodných stavieb – väčšinou malých vodných elektrární.

### **Doc. Ing. Radomil Květon, PhD.**

Narodil sa 30. septembra 1954 v Krnove (teraz ČR). Študoval na Gymnáziu Jura Hronca v Bratislave (1970 – 1974) v triede so zameraním na programovanie výpočtovej

techniky. Štúdium na Elektrotechnickej fakulte Slovenskej vysokej školy technickej v Bratislave absolvoval v odbore Fyzika tuhých látok a ukončil ho štátnymi skúškami v roku 1979. V diplomovej práci sa venoval problematike matematického modelovania nelineárnych nerovnovážnych systémov. Popri štúdiu pracoval vo Výskumnom ústave vodného hospodárstva v Bratislave ako programátor analytik (1975 – 1979), kam aj po ukončení štúdia nastúpil do trvalého pracovného pomeru (1979 – 1992). Od roku 1993 pracuje vo firme ETIRS, spol. s r. o., ktorá sa zameriava na matematické modelovanie prúdenia povrchových vôd a tvorbu špecializovaných technicko-ekonomických informačných systémov.

**Pôsobenie v pedagogickej oblasti** – V období rokov 2001 – 2006 pôsobil ako hosťujúci docent na Katedre hydrotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Tu prednášal predmet Matematické modelovanie v hydraulike, ktorý sa neskôr transformoval na predmet Hydroinformatika. V roku 2007 obhájil habilitačnú prácu a prednáša predmety Hydraulika II, Hydraulika povodní a GIS mapovanie, Prúdenie tekutín. V rámci postgraduálneho štúdia okrem už uvedených predmetov viedol prednášky na témy Výpočtová hydraulika, Využitie výpočtovej techniky vo vodnom hospodárstve, Hodnotenie vplyvu na životné prostredie metodikou EIA a Synergetika. V kurzoch Európskeho sociálneho fondu (ESF) Celoživotného vzdelávania v stavebníctve a geodézii zabezpečoval prednášky Moderné metódy v hydrodynamike otvorených korýt a podzemných vôd – časť Hydraulika otvorených korýt, (2006), Hydroinformatika – časť Numerické riešenie hydraulických procesov otvorených korytách, (2006), Hydrologické a hydraulické aspekty protipovodňovej ochrany (2007).

**Pôsobenie v odbornej a vedeckej oblasti** – Špecializuje sa na problematiku matematického modelovania prúdenia povrchových vôd, možnosti aplikácie termodynamiky nerovnovážnych procesov pri prúdení tekutín a popis procesov na základe nelineárnych rovníc. Je spoluautorom 2 monografií, 2 skrípt (CD pre ESF), autorom alebo spoluautorom 64 odborných a vedeckých článkov. Zúčastnil sa na riešení 7 medzinárodných projektov, 4 národných projektov a 43 výskumných úloh a expertíz. Je členom Odborovej komisie VHI (2010 – ) a Pracovnej skupiny 5 „Povodne“ pri Ministerstve životného prostredia SR (2010 – doteraz).