

**Expertný systém pre podporu dispečerského riadenia Sústavy vodných diel
Gabčíkovo - Nagymaros**

Expert system for a dispatching control of Waterwork Gabčíkovo - Nagymaros

Abstract

Aim of the work was to create essential elements of an expert system (ES) that provide effective support for a dispatching control of Waterwork Gabčíkovo - Nagymaros (SVD-GN). Work was focused on reaching maximal operation safety of SVD-GN during flood discharges while maintaining operation of Gabčíkovo hydroelectric power plant. The work resulted in the parts of an expert system that consists of an inference engine, database and knowledge base during flood discharges for supporting the dispatching control of the Waterwork Gabčíkovo - Nagymaros (SVD-GN). The operation parameters of SVD-GN are a part of the external database including structure operation and prepared manipulation with discharge through SVD-GN. From steering matrix which was generated before, it is possible to provide the dispatcher with aggregate information from database and knowledge base. Dispatcher is also provided with information about expected impact of intended manipulation on operation parameters of SVD-GN along with information about possibilities and its real feasibility on structures of SVD-GN. The work also include proposal of an electronic version of the operation manual with the "watch dog" function.

Key words:

Expert system, Waterwork Gabčíkovo – Nagymaros, dispatching control support

1 ÚVOD

S rastúcou zložitou vodných stavieb a s rastúcim objemom vstupných dát sa zväčšujú nároky na riadenie vodných stavieb (VS), hlavne na riadenie v reálnom čase. Preto si kladieme otázku, či by sa aspoň časť dispečerského rozhodovania nedala presunúť na automatizované systémy riadenia alebo zabezpečiť zvýšenú podporu dispečerského rozhodovania. Takéto systémy by mali byť vybavené schopnosťou rozpoznávať rôzne javy, analyzovať vzťahy medzi nimi, vyvodzovať logické závery pre rozhodovanie, predvídať ich dôsledky, zdokonaľovať svoje schopnosti učením a pod. Vlastnosti a schopnosti takýchto umelo vytvorených technických systémov sa súhrnne nazývajú „umelá inteligencia“ (AI). Predstavujeme si ju ako zjednodušenú aproximáciu prirodzenej intelektuálnej činnosti človeka. Expertné systémy (ES), genetické algoritmy a neurónové siete sa javia ako najnádejnejšie smery AI pre aplikáciu vo vodnom hospodárstve.

1.1 Umelá inteligencia a riešenie hydraulických problémov

Využitie nástrojov a postupov umelej inteligencie (AI – Artificial Intelligence) sa čoraz viac uplatňuje pri súčasnom riešení nielen teoretických, ale hlavne praktických technických úloh. Typickými oblasťami v hydrotechnike sú úlohy spojené s optimalizáciou prevádzky vodohospodárskych objektov v bežnej prevádzke a zvýšenie bezpečnosti prevádzky VS v extrémnych prípadoch.

Životné prostredie je v období klimatickej zmeny čoraz viac zaťažované extrémnymi hydrologickými dejmi, ktoré musia byť následne buď celkovo, alebo aspoň čiastočne eliminované činnosťou na vodohospodárskych (VH) objektoch s cieľom zabezpečiť maximálnu bezpečnosť prevádzky VH objektov.

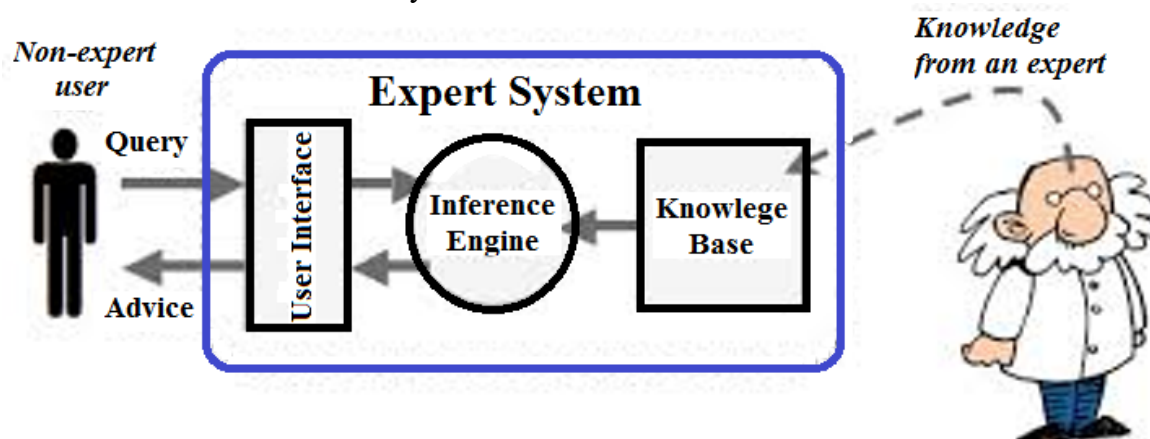
1.2 Expertné systémy

S rozvojom metód AI sa v 2. polovici 70. rokov minulého storočia dospelo k poznaniu, že pre vysokú efektívnosť systémov AI sú rozhodujúce použité znalosti, zatiaľ čo obecný formálny aparát pre riešenie úloh poskytuje iba nástroj pre využívanie znalostí, a hrá teda skôr druhoradú úlohu. Značná pozornosť sa preto začala venovať problémom získavania, reprezentácie a využívania špeciálnych, expertných znalostí. Tak vznikli expertné systémy, ktorých sila spočíva práve v kvalite a rozsahu znalostí. Charakteristickým rysom expertných systémov (ES) je využívanie znalostí k vyvodzovaniu nových poznatkov.

Expertné systémy sa skladajú z:

- Databázy znalostí (Knowledge Base) – obsahuje vedomosti a skúsenosti expertov, ktoré sú obsiahnuté napr. v manipulačných poriadkoch vodných diel.
- Databázy dát (Data Base) – súbor všetkých údajov k danému prípadu, a to nielen historických, ale aj hypotetických, ktoré sú získané napr. prostriedkami modelového výskumu alebo matematického modelovania (MM).
- Riadiaceho mechanizmu (Inference Engine) – jeho úlohou je efektívne riadiť proces využívania databáz znalostí a dát s cieľom vyriešiť danú úlohu optimálnym, a hlavne bezpečným spôsobom.

Schéma takto definovaného expertného systému je zobrazená na obrázku 1.1. Takýto expertný systém môžeme označiť ako klasický.

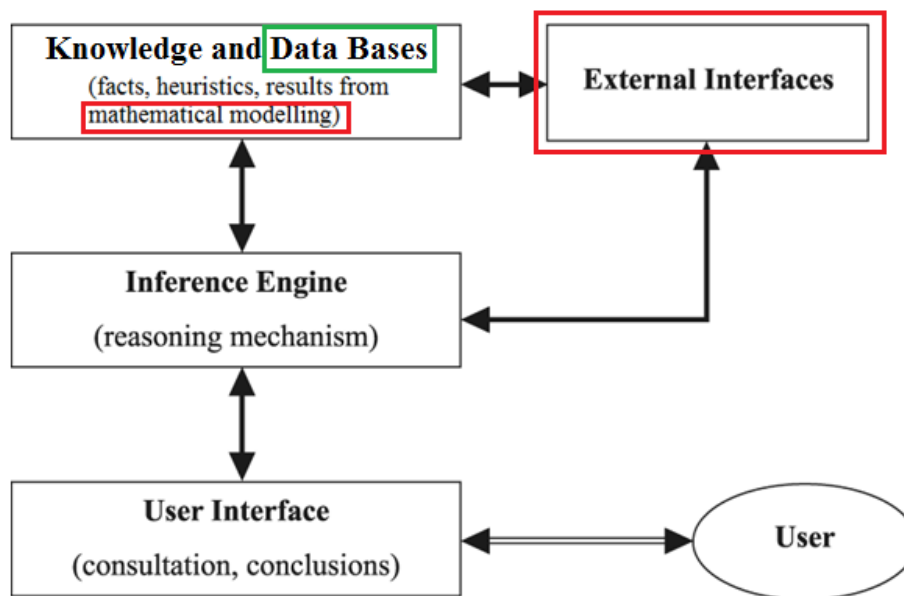


Obr. 1.1 Schéma klasického expertného systému (<http://www.igcseict.info>)

V takto definovanom systéme nám pre aplikovanie pri riešení vodohospodárskych (VH) problémov chýba modul styku s premenlivým vonkajším prostredím (External Interfaces). Schéma rozšíreného expertného systému s integrovaným rozhraním styku s vonkajším prostredím je na nasledujúcom obrázku 1.2.

Rozhranie s vonkajším prostredím (External interfaces) poskytuje expertnému systému z jednej strany:

- výsledky vonkajších meraní na vodnom diele,
- odvodené údaje ako sú napr. prietok a spád vody,
- informácie o prevádzkovom stave VH objektov na vodnom diele,
- prognózy vývoja dôležitých hydraulických charakteristík prúdenia vody ako je napr. predpokladaný nárast povodňového prietoku (predpovedná služba SHMÚ).



Obr. 1.2 Schéma rozšíreného expertného systému (expertsystem101.weebly.com)

Z druhej strany môže expertný systém cez rozhranie s vonkajším prostredím poskytovať:

- informácie pre autonómne riadiace systémy inštalované na VH objektoch,
- informácie o realizovaných a pripravovaných zmenách v prietoku pod VH stavbou pre centrálné riadiace orgány zriadené štátom – povodňové komisie.

Prevádzkanie extrémnych povodňových prietokov bude aj v budúcnosti riadené dispečermi na vodnom diele, a to vzhľadom na:

- hroziace vysoké škody, a to nielen hospodárske,
- nedostatok historických skúseností s prevádzkaním povodní, prakticky každá povodeň je jedinečná (kulminačný prietok, objem povodňovej vlny, dĺžka trvania povodne, strmosť nábehu a poklesu povodňovej vlny),
- nepresnosť výsledkov matematického modelovania, ktorá je daná zjednodušením modelovanej sústavy a zjednodušením charakteru prúdenia vody cez modelovaný subjekt.

2 CIEĽ PRÁCE A RIEŠENÉ ÚLOHY

Cieľom práce bolo vytvoriť základné prvky expertného systému zabezpečujúceho efektívnu podporu dispečerského riadenia Sústavy vodných diel Gabčíkovo – Nagymaros (SVD–GN) dosahujúceho maximálnu bezpečnosť prevádzky SVD-GN pri prevedení povodňových prietokov od $6142 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1. stupeň povodňovej aktivity (SPA)).

Na dosiahnutie tohto cieľa boli stanovené a riešené nasledovné úlohy:

- I. Hydraulická analýza prevedenia povodňovej vlny z roku 2013 (2002).
- II. Rozdelenie modelovaného úseku Dunaja Devín – Medveďov na dve samostatne modelované oblasti
 - A. úsek Devín – stupeň Čunovo – model HEC-RAS (27,62 km)
 - B. úsek stupeň Čunovo – Medveďov – model HDM2012 (staré koryto Dunaja 40,75 km, derivačný kanál 38,17 km).
- III. Zostavenie modelov, ich kalibrácia a aplikácia na prevedenie povodňovej vlny.
- IV. Analýza vodohospodárskych objektov SVD-GN prevádzkovaných počas povodňových prietokov, digitalizácia merných kriviek objektov z manipulačného poriadku

(Vodohospodárska výstavba, 2015, 2012) a vytvorenie nástrojov na poskytovanie odvodených prevádzkových údajov VH objektov.

- V. Vygenerovanie prevádzkových scenárov do databázy znalostí pre prevádzkanie povodňových prietokov cez SVD-GN od $Q = 6\,100$ (1. SPA) do $11\,100$ (viac ako Q_{100}) $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (55 scenárov prevádzkania uvedených povodňových prietokov do databázy dát).
- VI. Vytvorenie nástrojov na viacrozmerné vyhľadávanie a interpolovanie (riadiaci mechanizmus) v scenároch prevádzky (databáza dát) s poskytnutím údajov o rozhodujúcich hydraulických údajoch ako sú horné a dolné prevádzkové hladiny na manipulačných objektoch vodnej elektrárne Gabčíkovo (VEG) a stupňa Čunovo.
- VII. Preskúmanie možnosti realizácie elektronickej verzie manipulačného poriadku VS a jej prínosov (databáza znalostí).

3 ZÁUJMOVÁ OBLASŤ APLIKÁCIE METÓD AI

3.1 Rozdelenie oblasti podľa vodohospodárskeho účelu

Zájmovú oblasť aplikácie metód AI pre potreby prevádzkania povodňových prietokov cez vodohospodárske stavby môžeme vo všeobecnosti rozdeliť na dve časti:

1. Oblasť **A**, ktorá sa nachádza nad VS, začína v riečnom profile, v ktorom je zabezpečené meranie hladín (odvodený údaj o prietoku vody), a v ktorom je zabezpečená predpovedná služba vývoja povodňovej situácie. Na tomto úseku toku je predpokladaná transformácia povodňového prietoku, ktorej výsledky slúžia ako vstupný prietok do oblasti B.
2. Oblasť **B** samotnej VS, ktorá je tvorená samotnými VH objektmi a ich prepojením, ktorým je definovaná ich vzájomná interakcia. Spôsob prevádzkania povodňových prietokov má byť jednoznačne daný záväzným manipulačným poriadkom VS.

Zájmová oblasť je vymedzená na hornom okraji profilom Bratislava – Devín 1880,08 rkm a na dolnom okraji profilom Medved'ov – most 1806,3 rkm (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Zájmová oblasť aplikácie metód AI (zdroj www.google.sk/maps/)

3.2 Výber nástrojov pre matematické modelovanie

Modelovaný úsek Dunaj Devín – Medved'ov bol rozdelený na dve samostatne modelované oblasti:

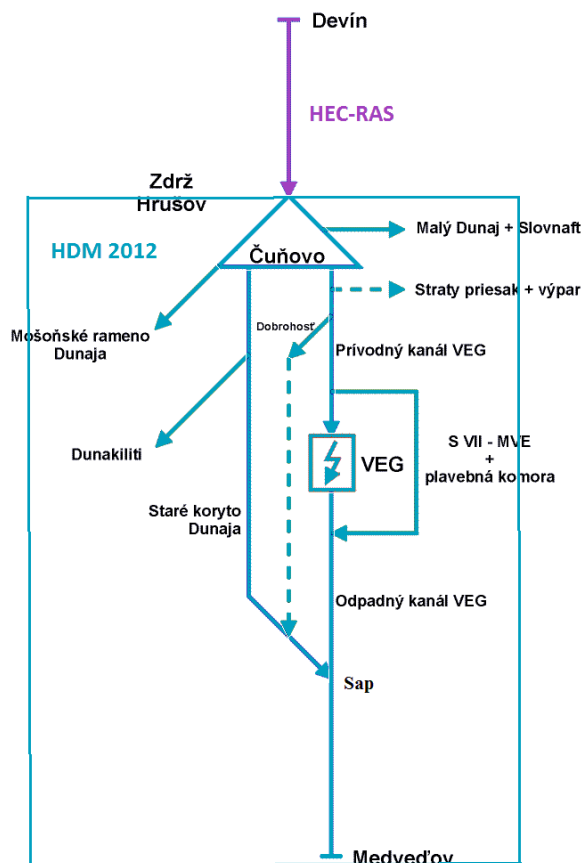
- A. úsek Devín – stupeň Čunovo – model HEC-RAS (27,62 km),
- B. úsek stupeň Čunovo – Medved'ov – model HDM2012 (staré koryto Dunaja 40,75 km, derivačný kanál 38,17 km).

Pre potreby riešenia bola záujmová oblasť rozdelená na dva samostatné modely:

- **Model oblasti A realizovaný v prostredí HEC-RAS** - bol prevzatý z riešenia výskumnej úlohy Vodohospodársky model prevádzky VD Gabčíkovo riešenej na katedre HTE v spolupráci s VÚVH Bratislava – tento som kalibroval na povodňové prietoky (VÚVH, 2008).
- **Model oblasti B HDM 2012** je model vyvinutý na katedre HTE na riešenie hydraulických úloh prevádzky kanálových VE. Model bol, počnúc verziou 2002, úspešne nasadený na riešenie problematiky kanálových VE na Váhu ako aj v rámci riešenia čiastkových úloh na SVD-GN. Veľkou výhodou HDM oproti modelovaciemu prostrediu HEC-RAS je, že má priamo včlenené objekty typu vodná elektrárň, ktorý HEC-RAS nemá k dispozícii (Možiešik, Ľ. a kol., 2008).

Na obrázku 3.2 **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** je zobrazená hydraulická schéma záujmovej oblasti spolu s rozdelením na využitie modelovacích nástrojov HEC-RAS a HDM2012. Dominantným viacúčelovým objektom je vodná elektrárň Gabčíkovo (VEG). Pri bežných prietokoch je jej hlavnou úlohou efektívne využiť prietok vody v Dunaji na výrobu elektrickej energie a zabezpečiť plavbu na Dunaji cez dve plavebné komory.

Pri povodňových situáciách je to prevádzkanie povodňových prietokov cez osem turbín v energetickom režime, a to až do poklesu spádu vody na VEG pod hodnotu 13 m. Potom prichádza k odstaveniu turbín z energetickej prevádzky a pokles prietoku cez turbíny sa má nahradiť prietokom cez plavebné komory (PLK) a obtoky PLK (Dušička, Květon, 2002).



Obr. 3.2 Hydraulická schéma záujmovej oblasti a aplikácie matematických modelov

Vzhľadom na nie najlepší technický stav PLK sa nasadenie uvedeného postupu odkladalo na poslednú chvíľu aj v roku 2013 a turbíny boli prevádzkované počas troch dní aj tesne pod povolenú hranicu spádu 13 metrov. Skúsenosti z roku 2013 sa premietli do návrhu dočasného manipulačného poriadku X. (DMP), ktorý takýto postup bude zrejme legalizovať aj v budúcnosti.

4 ANALÝZA VODOHOSPODÁRSKÝCH OBJEKTOV SVD-GN

Základnou dokumentáciou pre riešenie povodňových stavov na vodnom diele je Povodňový plán zabezpečovacích prác SVD GN (VV, š.p.) a Povodňový plán zabezpečovacích prác SVP, š. p., OZ Bratislava.

Povodňovým prietokom sa rozumie prietok, ktorý v rozhodujúcom profile Bratislava – Devín dosiahne hodnotu $6\,142\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a viac, čo je I. stupeň povodňovej aktivity (I. stupeň PA – 670 cm – vodný stav vo vodomernom profile Bratislava – Devín).

Pre potreby získania relevantných údajov do databáz dát a znalostí pre ES som vykonal analýzu VH objektov SVD-GN s cieľom zdigitalizovať krivky prevádzkových parametrov objektov podieľajúcich sa na prevádzaní povodňových prietokov cez SVD-GN a vytvoriť nástroje pre riadiaci systém ES.

4.1 Stupeň Čunovo - hlavné prevádzkové parametre

Pod pojmom stupeň Čunovo sa rozumie skupina objektov s rôznym významom, funkciou a využitím. Patrí sem prehradenie koryta Dunaja, odberný objekt do Mošonského ramena Dunaja, hať v inundácii, vodná elektráreň Čunovo, stredová hať, pomocná plavebná komora, sklz pre športovú plavbu, umelý kanál pre vodácke športy, hať na obtoku, prevádzkový prístav Čunovo, priepich v hornej vode, priepich v dolnej vode, dočasná dnová prehrádzka v rkm 1843, zdrž Hrušov a jej hrádze, priesakové kanály a objekty na kanáloch, derivačný kanál a objekty na ňom, aj polder v pravostrannej inundácii zdrže a MVE Dobrohošť.

Objekty, ktoré zohrávajú najvýznamnejšiu úlohu pri prevádzaní povodňový prietokov cez stupeň Čunovo sú VE Čunovo, hať na obtoku, hať v inundácii a stredová hať (Obr. 4.1). Hlavné prevádzkové parametre týchto objektov som uviedol do tabuliek, v príspevku uvádzam príklad pre hať v inundácii (Tab. 4.1).

Hať v inundácii je vybudovaná na pravej strane Dunaja, v jeho inundácii. Účelom hate je odvádzať vodu do koryta Dunaja v spolupráci so stredovou haťou a haťou na obtoku. Na obrázku 4.2 je uvedený postup digitalizácie údajov a stanovenie konkrétneho prietoku objektu hate v inundácii, umožňujúci zaradenie údajov do databázy dát ES a riadiacemu systému ES získať kapacitu objektu na základe informácie o počte vyhradených haťových polí a hladiny vody na stupni Čunovo. Prietokná kapacita je daná počtom vyhradených haťových polí, riadiaci mechanizmus ES tak môže modelovať aj prietok haťou pri výpadku haťových polí z prevádzky. Obdobne som spracoval všetky relevantné objekty.

Tab.4.1 Hať v inundácii

Hať v inundácii	hodnota	jednotky
počet haťových polí	20	[ks]
šírka 1 poľa	24	[m]
hradiaca výška	3,6	[m]
kapacita hate pri hl. v zdrži 130,10 m n.m.	2400	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
kapacita hate pri hl. v zdrži 131,10 m n.m.	5200	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
kapacita hate pri hl. v zdrži 131.50 m n.m.	5830	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]

Poznámky:

1. Hodnoty prietoku cez objekt sú pre dokonalý prepád. Tieto by bolo vhodné doplniť o údaje o možnom vplyve zníženia spádu na stupni Čunovo na veľkosť prietoku.
2. Hodnoty prietoku v DMP sú uvedené ešte pre rôzne zdvihy dolnej hrany segmentu (od 0,25 do 2,5 m s krokom 0,25 m). Tieto by bolo vhodné tiež digitalizovať a tak popísať aj situácie poruchy zdvihacieho zariadenia (napr. zaseknutie pri určitom zdvihu)

Rozdelenie prietokov na jednotlivé objekty a postup zapájania jednotlivých objektov stupňa Čunovo do prevádzania vody cez stupeň podľa DMP X. je uvedené v Tab. 4.2, a to pre prípad, že je v prevádzke na VE Gabčíkovo 8 TG. Prevádzková hladina v zdrži je na kóte max. 131.10 m n. m. v profile rkm 1851,75 (pri Q_{100} 131,50 m n.m., pri Q_{1000} 132,00 m n. m.).

Logické nezrovnalosti v Tab. 4.2 sú predovšetkým v stanovení odberov a strát, ktoré sa pri zmene prietoku v profile Devín medzi 6 500 a 13 500 $m^3.s^{-1}$ nemenia. Chýbajúce údaje o prietoku v profile Sap by boli užitočné pre stanovenie informácie o sploštení povodňovej vlny na úseku Devín – Sap. Údaj o prietoku cez profil Sap pre Q_{100} a Q_{1000} priamo spochybňujú údaj o stratách a odberoch, ktoré by mali byť logicky vo väzbe na predpokladaný prietok v profile Sap oveľa väčšie. Straty na prietoku na úseku od Devína po Sap pre Q_{100} (1 100 $m^3.s^{-1}$) a Q_{1000} (1 400 $m^3.s^{-1}$) v sebe zahŕňajú aj ďalšie straty na úsekoch:

1. straty na úseku Devín – SVD-GN v Tab. 7.5 sa predpokladajú ako nulové
2. straty v starom koryte Dunaja od objektov Čunovo po Sap

Tab. 4.2 Odvedenie povodňových prietokov cez SVD-GN podľa DMP X.

Stupeň Čunovo					Odbery a straty	VEG	Q _{DEV}	Sap
VE Čunovo	Stredová hať	Hať na obtoku	Hať v inundácii	Σ SKD				
[m ³ .s ⁻¹]								
360	500	200	351	1411	180	4409	6000	
360	600	200	520	1680	***330	4490	6500	
360	800	200	910	2270	***330	4400	7000	
-	1570	400	1100	3070	***330	4100	7500	
-	1870	600	1400	3870	***330	3800	8000	
-	2125	600	1800	4525	***330	3845	9000	
-	2700	800	2410	5910	***330	3760	10000	
-	3200	900	3190	7290	***330	*3380	11000	9900
-	3300	1140	5110	9550	***330	*3620	**13500	**12100

* - povodňové prietoky na stupni Gabčíkovo sa prepúšťajú cez VE a PLK

** - prietok Dunaja v Sape bude 12 100 $m^3.s^{-1}$ (sploštenie povodne)

*** - vrátane odberného objektu Dobrohošť max. 90 $m^3.s^{-1}$

Táto tabuľka (Tab. 4.22) je pritom jediný návod na proces, ktorý sa nazýva **prerozdelenie prietokov** medzi staré koryto Dunaja a VEG.

Tabuľka 4.3 ukazuje maximálne kapacity objektov na stupni Čunovo. Hodnoty pre posledné dva stĺpce sú pri povodňových stavoch, kedy prietok cez objekty negatívne ovplyvňuje dolná voda. Tieto údaje platia pri súbežnom využívaní týchto hydrotechnických objektov.

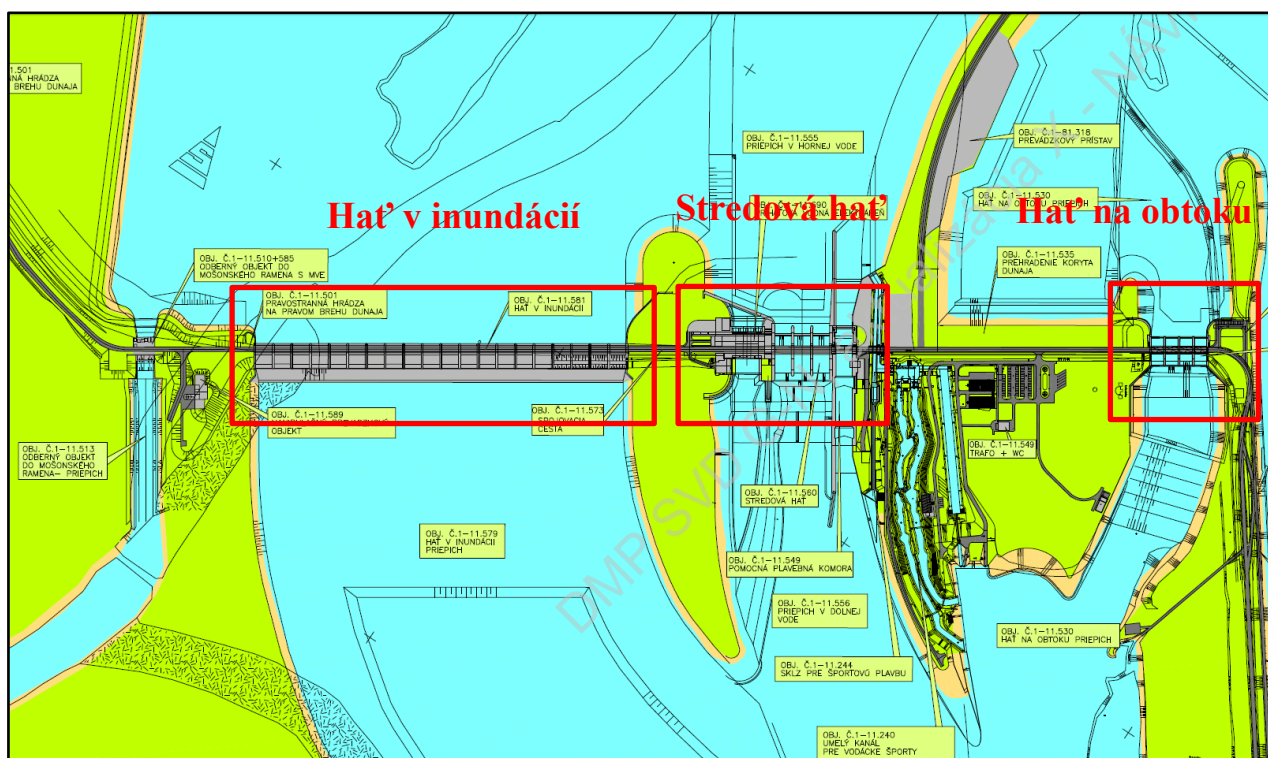
Tab. 4.3 Maximálne kapacity objektov na stupni Čunovo

Objekty na stupni Čunovo	Bežné prietoky	Zvýšené prietoky	Q ₁₀₀	Q ₁₀₀₀
horná hladina [m n. m.]	do 131,10	131,50	131,50	132,00
dolná hladina [m n. m.]	x	x	do 130	x
odberný objekt a MVE Mošon	40	0	0	0
Hať v inundácii [m ³ .s ⁻¹]	5200	6995	5407 (*5830)	**6700
VE Čunovo [m ³ .s ⁻¹]	360	0	0	0
Stredová hať [m ³ .s ⁻¹]	3300	4345	2666 (*3800)	**3500
Po PLK [m ³ .s ⁻¹]	0	0	0 (*200)	200
Hať na obtoku [m ³ .s ⁻¹]	1420	1638	1390 (*1600)	**1800
Spolu [m³.s⁻¹]	10 320	12 978	9463 (*11 430)	12 200

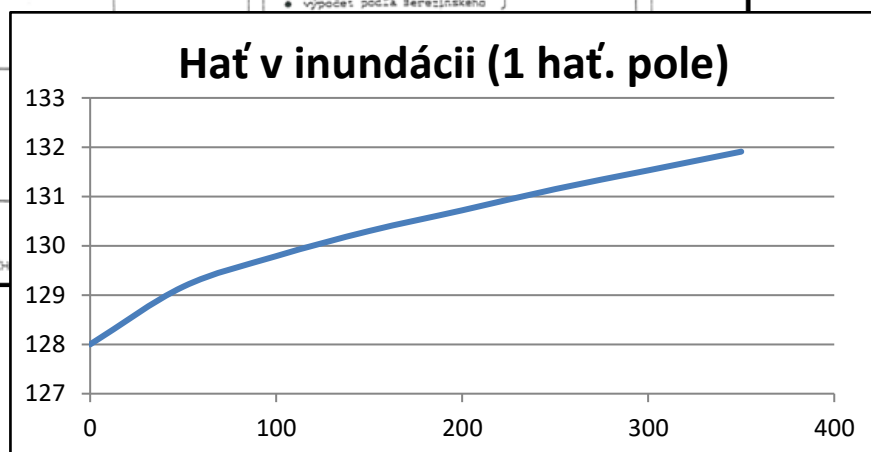
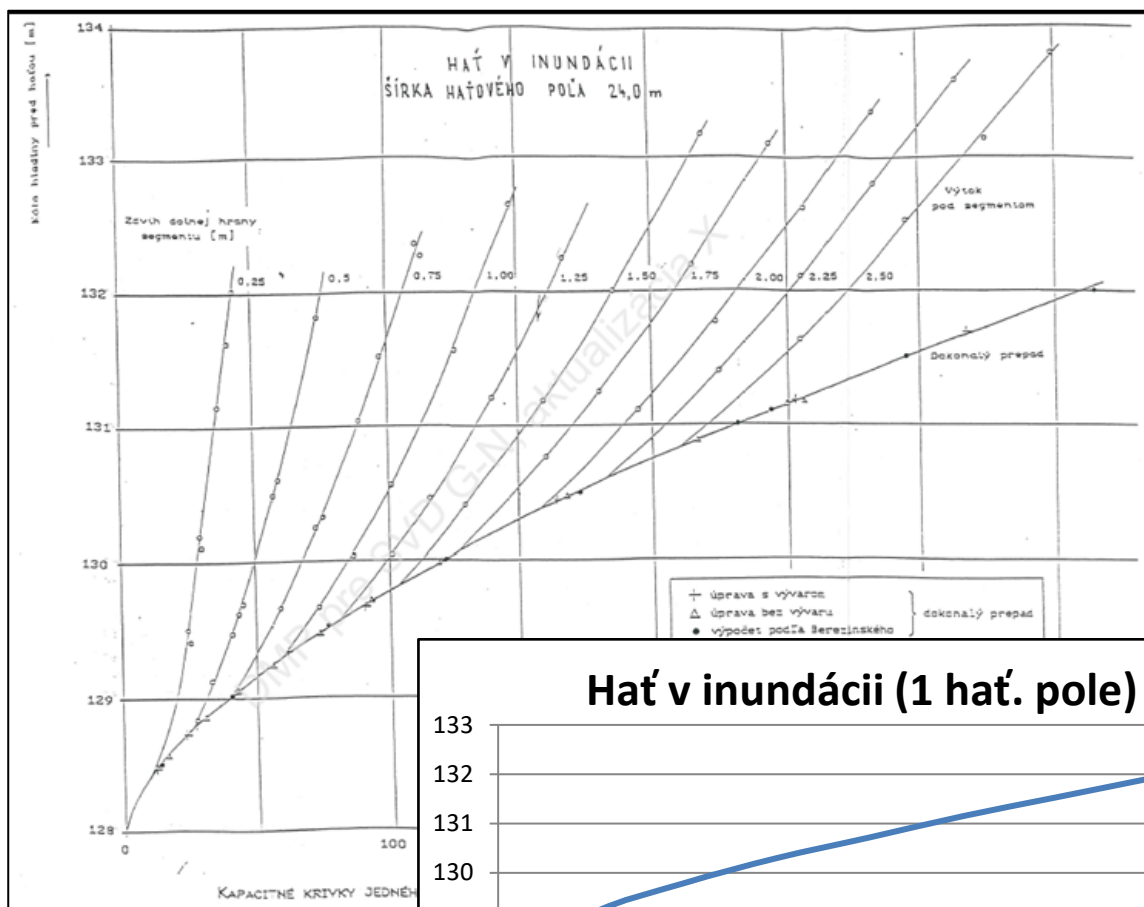
* údaje prevzaté z práce: VD GA, stupeň Čunovo, kalibrácia hydrotechnických objektov, VÚVH 2008

** údaje sú extrapolované z práce: VD GA, stupeň Čunovo, kalibrácia hydrotechnických objektov, VÚVH 2008

Modrým obdĺžnikom sú vyznačené hodnoty hornej a dolnej hladiny pre prietok Q₁₀₀ na stupni Čunovo. Je to jediný údaj v celom DMP o požadovanom spáde vody na stupni Čunovo, zabezpečujúci prevedenie vody s celkovým maximálnym prietokom 9 463 m³.s⁻¹.



Obr.4.1 Stupeň Čunovo - situácia



Q [m ³ .s ⁻¹]	hl [m n.m.]
0	128
50	129.17
100	129.79
150	130.3
200	130.72
250	131.15
300	131.53
350	131.91

Hať v inundácii	počet hať. polí		hladina	Q
	[ks]	vyhradených	[m n.m.]	[m ³ .s ⁻¹]
	20	20	130.164	2733.33

Obr. 4.2 Hať v inundácii - digitalizácia parametrov a stanovenie konkrétneho prietoku

4.2 Stupeň Gabčíkovo - hlavné prevádzkové parametre

Stupeň Gabčíkovo tvorí vodná elektráreň Gabčíkovo, plavebné komory a odberný objekt S-VII (kanál Gabčíkovo – Topoľníky) s energetickým využitím. Rozhodujúcimi objektmi pri prevádzaní povodňových prietokov sú plavebné komory s obtokmi a VE Gabčíkovo (Obr.4.3).

Vodná elektráreň Gabčíkovo využíva hydroenergetický potenciál Dunaja na výrobu elektriny. Hydroenergetický potenciál sa využíva aj počas povodňových prietokov, pokiaľ to umožňujú spádové pomery.

Vo VE Gabčíkovo je inštalovaných 8 TG s jednotkovým dosiahnuteľným výkonom 90 MW, s celkovým výkonom elektrárne 720 MW. Prevádzka vodnej elektrárne bez vybudovania dolného stupňa sústavy Nagymaros, je priebežná s hladinovou reguláciou na objektoch zdrže Hrušov, prírodného kanála a VEG.

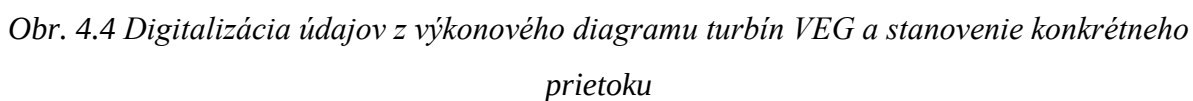
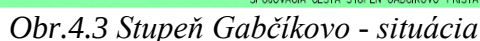
Hlavné prevádzkové parametre VEG sú uvedené v tabuľke 4.4. Na Obr. 4.4 je uvedený postup digitalizácie údajov a stanovenie konkrétneho minimálneho a maximálneho prietoku cez VEG, umožňujúci zaradenie údajov do databázy dát ES a riadiacemu systému ES získať kapacitu VEG pre konkrétny spád na stupni Gabčíkovo. Riadiaci mechanizmus ES má k dispozícii hodnoty minimálneho a maximálneho prietoku cez jednu turbínu ako aj maximálny a minimálny prietok cez všetky turbíny v prevádzke pri danom spáde na stupni Gabčíkovo.

Tab. 4.4 VEG hlavné prevádzkové parametre

Vodná elektráreň Gabčíkovo	IX. DMP	X. DMP	jednotka
počet turbín	8		[ks]
typ	kaplan 4-K-15G		
inštalovaný výkon	90 x 8 = 720	90 x 8 = 720	[MW]
hltnosť	413 až 636	413 až 636	[m ³ .s ⁻¹]
max. horná hladina	131.1	131.1	[m n.m.]
min. horná hladina	128.5	128.5	[m n.m.]
min. horná hladina pri výnim. stave	128.2	128.2	[m n.m.]
min. využitelný spád	13	13	[m]
min. možný spád (výnimočne)	12.5	12.88 (12,70)	[m]

Údaj uvedený o minimálnom možnom spáde (výnimočnom) je v návrhu DMP X. **zvyššený** na základe konkrétnych skúseností s povodňou 2013 a technickom stave TG, ktoré budú potrebovať generálnu údržbu.

SITUÁCIA



11

merných kriviek objektov vložených do bázy dát ES. Prínosom je aj odstránenie subjektívnych chýb dispečera pri odčítaní údajov z merných kriviek v DMP.

Vytvára sa tak pre dispečera dostatočný časový priestor na variantné riešenie konkrétnej povodňovej situácie.

Podobne boli zdigitalizované aj údaje pre PLK a obtoky PLK.

5 VYGENEROVANIE MATICE PREVÁDZKOVÝCH STAVOV

Potreba naplnenia databázy dát ES údajmi matice riadenia umožňujúcimi v ďalšom kroku rýchlu a efektívnu podporu dispečerského riadenia je logická a bola podporená výsledkami štúdie DMP IX. A X.

5.1 Matice prevádzkových stavov

Riadenie rozhodovacieho procesu na základe matíc prevádzkových stavov (ďalej len matice riadenia) je pri riešení zložitých dejov založené na vygenerovaní viacrozmerných matíc riešenia pre konkrétnu postupnosť hodnôt základných parametrov konkrétnej úlohy. Dimenzia matíc je daná počtom základných parametrov systému. Výber postupnosti hodnôt pre daný základný parameter systému musí zohľadňovať nelinearitu modelovaného systému. Údaje do matice riadenia sú generované prostriedkami matematického modelovania.

Prerozdeľovanie povodňového prietoku cez VH objekty SVD-GN je zložitý proces so základnými parametrami:

1. Kóta hladiny vody v Hrušovskej zdrži (128,20 – 132,00 m n. m.)
2. Prítok Dunaja do Hrušovskej zdrže (časovo transformovaný a veľkosťou redukovaný prietok Dunaja v profile Devín)
3. Rozdelenie prietoku medzi staré koryto Dunaja a VEG

Z uvedeného vyplýva, že všeobecná matica riadenia SVD-GN by mala byť trojrozmerná (Obr. 5.1). V mojom konkrétnom prípade som riešenie orientoval na maximálne energetické využitie prietoku cez VEG a teda som zvolil vo výpočtoch kótu hladiny v Hrušovskej zdrži zodpovedajúcu maximálnej prevádzkovej hladine.

Za tejto podmienky sa počet základných parametrov zredukoval na:

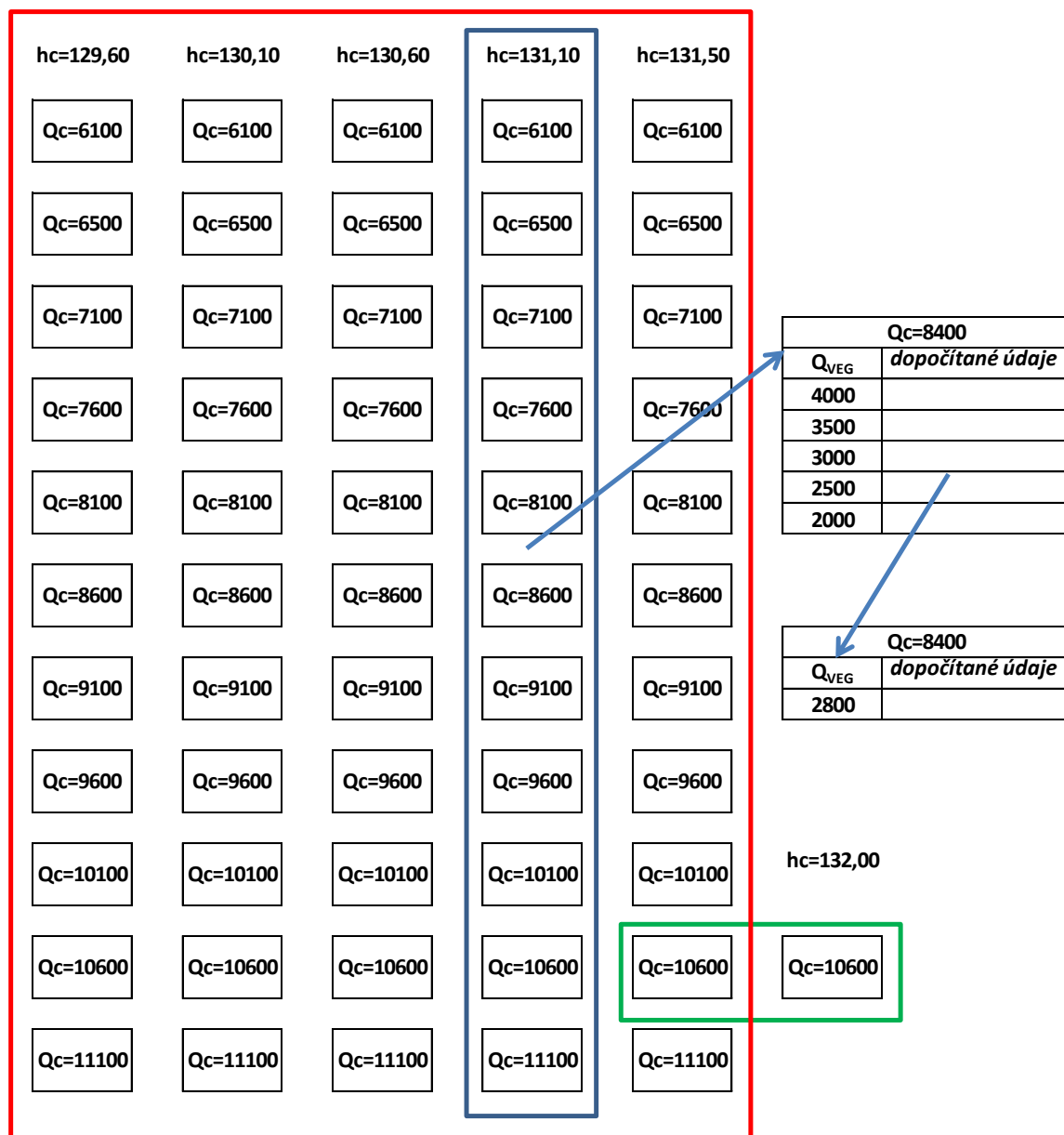
1. Prítok Dunaja do Hrušovskej zdrže, postupnosť generovaných hodnôt je od 1. SPA 6 100 m³.s⁻¹ do 11 100 m³.s⁻¹ s krokom 500 m³.s⁻¹.
2. Rozdelenie prietoku medzi staré koryto Dunaja a VEG je realizované cez parameter prietoku cez VEG, postupnosť generovaných hodnôt od 4 000 m³.s⁻¹ do 2 000 m³.s⁻¹ s krokom 500 m³.s⁻¹. Hodnota parametra prietoku cez staré koryto Dunaja je dopočítaná hodnota do veľkosti prietoku v profile stupňa Čunovo.

Na obrázku 5.1 je ukázaná štruktúra základnej trojrozmernej matice riadenia SVD-GN pre široký rozsah riadenia procesu prevádzania povodňových prietokov od 6 100 do 11 100 m³.s⁻¹ a s regulovanou hladinou v Hrušovskej zdrži od 129,60 do 131,50 m n.m. (červené orámovanie). Úplnú maticu riadenia by sme dostali až vygenerovaním všetkých možných prevádzkových stavov pre kóty hladiny vody v Hrušovskej zdrži (128,20 – 132,00 m n. m.). Ďalším možným rozšírením by bolo doplnenie prevádzkových stavov pre širší rozsah prietokov cez VEG na 1 500 až 4 500 m³.s⁻¹.

V práci je riešená dvojrozmerná matica riadenia pre maximálnu prevádzkovú hladinu v Hrušovskej zdrži 131,10 m n. m (modré orámovanie).

Pre výnimočné hladiny v Hrušovskej zdrži, ktoré sú spojené s prietokmi Q₁₀₀ a Q₁₀₀₀, boli realizované výpočty s celkovým prietokom na úrovni stupňa Čunovo 10 600 m³.s⁻¹ (zelené

orámovanie). Na obrázku 8.1 je ďalej znázornený postup výpočtov smerujúcich k určeniu dopadov určitého prerozdelenia konkrétneho prietoku cez profil stupňa Čunovo (modré šípky).



hc	[m n.m.]	kóta hladiny na stupni Čunovo
Qc	[m ³ .s ⁻¹]	celkový prietok na úrovni stupna Čunovo
Q _{VEG}	[m ³ .s ⁻¹]	prietok cez objekty VEG

Obr. 5.1 Štruktúra trojrozmernej matice riadenia

6 VYTVORENIE NÁSTROJOV NA VYHLADÁVANIE V MATICI RIADENIA

Výsledkom realizácie scenárov (definovaných v časti 5 tejto práce) je riadiaca matica 11 x 5 vektorov hydraulických parametrov v rozhodujúcich prierezoch vodohospodárskej stavby. V tabuľkách (Tab. 6.1 a Tab. 6.2) sú údaje z rezov úplnej matice riadenia pre prietoky $Q_c = 6100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $Q_c = 11100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V jednotlivých scenároch sú farebne vyznačené prekročenia kritických hodnôt prevádzkových parametrov. Príkladom je v tabuľke 9.3 červenou farbou označené zníženie spádu vody na VEG pod hodnotu 12,88 m (definovaná hladina pre krátkodobé poklesnutie minimálnej hodnoty spádu pre energetickú prevádzku turbín). Oranžovou farbou je označené zníženie spádu na VEG v intervale hodnôt 12,88 - 13 m.

Tab. 6.1 Rez maticou riadenia pre $Q_C = 6100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Q_C [m ³ ·s ⁻¹]		Stupeň Čunovo			Stupeň Gabčíkovo			Sap	Medveďov	
Staré koryto [m ³ ·s ⁻¹]	VEG [m ³ ·s ⁻¹]	Hl. horná [m n.m.]	Hl. dolná [m n.m.]	Spád [m]	Hl. Horná [m n.m.]	Hl. dolná [m n.m.]	Spád [m]	Hladina [m n.m.]	Hladina [m n.m.]	Q [m ³ ·s ⁻¹]
2100.00	4000.00	131.10	125.62	5.48	130.62	115.63	14.99	115.43	114.69	6100.00
2600.00	3500.00	131.10	126.10	5.00	130.74	115.63	15.11	115.44	114.69	6100.00
3100.00	3000.00	131.10	126.56	4.54	130.83	115.63	15.20	115.45	114.69	6100.00
3600.00	2500.00	131.10	127.00	4.10	130.89	115.63	15.26	115.46	114.69	6100.00
4100.00	2000.00	131.10	127.42	3.68	130.95	115.63	15.32	115.47	114.69	6100.00

Tab. 6.2 Rez maticou riadenia pre $Q_C = 11\,100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Q_C [m ³ ·s ⁻¹]		Stupeň Čunovo			Stupeň Gabčíkovo			Sap	Medveďov	
Staré koryto [m ³ ·s ⁻¹]	VEG [m ³ ·s ⁻¹]	Hl. horná [m n.m.]	Hl. dolná [m n.m.]	Spád [m]	Hl. horná [m n.m.]	Hl. dolná [m n.m.]	Spád [m]	Hladina [m n.m.]	Hladina [m n.m.]	Q [m ³ ·s ⁻¹]
7100.00	4000.00	131.10	129.56	1.54	130.62	119.01	11.61	118.75	117.69	11100.00
7600.00	3500.00	131.10	129.86	1.24	130.74	119.01	11.73	118.76	117.69	11100.00
8100.00	3000.00	131.10	130.15	0.95	130.84	119.01	11.83	118.77	117.69	11100.00
8600.00	2500.00	131.10	130.42	0.68	130.93	119.01	11.92	118.78	117.69	11100.00
9100.00	2000.00	131.10	130.69	0.41	130.99	119.01	11.98	118.79	117.69	11100.00

6.1 Viacrozmerná interpolácia údajov v matici riadenia

Riadiaci mechanizmus ES nám umožňuje v prvom kroku priestorovou interpoláciou vygenerovať rez maticou riadenia pre konkrétny prítok $Q_C = 9\,250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tab. 6.3).

Tab. 6.3 1. interpolácia v matici riadenia pre konkrétnu hodnotu $Q_C = 9\,250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Q_C [m ³ ·s ⁻¹]		Stupeň Čunovo			Stupeň Gabčíkovo			SAP	Medveďov	
Staré koryto [m ³ ·s ⁻¹]	VEG [m ³ ·s ⁻¹]	Hl. Horná [m n.m.]	Hl. dolná [m n.m.]	Spád [m]	Hl. horná [m n.m.]	Hl. dolná [m n.m.]	Spád [m]	Hladina [m n.m.]	Hladina [m n.m.]	Q [m ³ ·s ⁻¹]
5250.00	4000.00	131.10	128.30	2.80	130.62	117.87	12.75	117.66	116.69	9250.00
5750.00	3500.00	131.10	128.66	2.44	130.74	117.87	12.87	117.66	116.69	9250.00
6250.00	3000.00	131.10	129.02	2.08	130.84	117.87	12.97	117.66	116.69	9250.00
6750.00	2500.00	131.10	129.34	1.76	130.93	117.87	13.05	117.66	116.69	9250.00
7250.00	2000.00	131.10	129.65	1.45	130.99	117.87	13.12	117.66	116.69	9250.00

V druhom kroku sa realizuje výpočet vektora hydraulických parametrov pre konkrétne základné parametre $Q_C = 9\,250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $Q_{VEG} = 2\,800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tab. 6.4).

Tab. 6.4 2. interpolácia v matici riadenia pre konkrétny prítok $Q_{VEG} = 2\,800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

6450	2800	131.10	129.15	1.95	130.88	117.87	13.01	117.66	116.69	9250
------	------	--------	--------	------	--------	--------	-------	--------	--------	------

6.2 Prepojenie údajov z matice riadenia s databázami ES

Možnosti konkrétnej realizácie požadovaných prietokov na jednotlivých zariadeniach SVD-GN nám poskytne prepojenie výsledkov vyhľadávania v matici riadenia s databázami dát a znalostí. V Tab. 6.5 sú uvedené údaje z matice riadenia pre $Q_C = 9\,400\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a $Q_{VEG} = 2\,100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Tieto sú ďalej využité na ďalšie dispečerské rozhodnutia.

Tab. 6.5 Získané údaje z matice riadenia pre $Q_C = 9\,400\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a $Q_{VEG} = 2\,100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

$Q_{Devín} - Q_{Str}$ [m^3/s]	9400	Stupeň Čunovo			Stupeň Gabčíkovo			SAP	Medveďov	
Staré koryto [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Q_{VEG} [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Hl. Horná [m n.m.]	Hl. Dolná [m n.m.]	spád [m]	Hl. Horná [m n.m.]	Hl. Dolná [m n.m.]	spád [m]	Hladina [m n.m.]	Hladina [m n.m.]	Q [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
5400,00	4000,00	131,10	128,41	2,69	130,62	117,97	12,65	117,75	116,77	9400,00
5900,00	3500,00	131,10	128,77	2,33	130,74	117,97	12,78	117,75	116,77	9400,00
6400,00	3000,00	131,10	129,12	1,98	130,84	117,97	12,88	117,75	116,77	9400,00
6900,00	2500,00	131,10	129,44	1,66	130,93	117,97	12,96	117,75	116,77	9400,00
7400,00	2000,00	131,10	129,74	1,36	130,99	117,97	13,02	117,75	116,77	9400,00
7300	2100	131,10	129,68	1,42	130,98	117,97	13,01	117,75	116,77	9400

Submatica z Tab. 6.5 mi dáva priamo návod v akom intervale prietokov cez VEG mám hľadať riešenie problému prerozdelenia prietokov cez SVD-GN (t.j. medzi 2000 a 2500 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) s preferovaným energetickým využitím existujúceho hydropotenciálu na VEG.

Požadovaný prietok $Q_{VEG} = 2\,100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ je možné previesť iba cez turbínový prietok buď 4-mi alebo 5-timi TG (Tab. 6.6, údaje so zeleným podfarbením).

Tab. 6.6 Realizovateľnosť prietokov cez zariadenia VEG

VEG					
počet turbín	H	Q _{min}	Q _{max}	Q	realizovateľnosť
[ks]	[m]	[m ³ .s ⁻¹]			
1	13,01	413	526,40	2100	0
2	13,01	826	1052,80	2100	0
3	13,01	1239	1579,20	2100	0
4	13,01	1652	2105,60	2100	1
5	13,01	2065	2632,00	2100	1
6	13,01	2478	3158,40	2100	0
7	13,01	2891	3684,80	2100	0
8	13,01	3304	4211,20	2100	0

Plavebné komory					
inštalované	v prevádzke	hl. horná	Q _{1PLK}	ΣQ	realizovateľnosť
[ks]		[m n.m.]	[m ³ .s ⁻¹]		
2	1	130,98	1288,9	1288,9	1

Obtoky PLK					
inštalované	v prevádzke	H	Q _{1obt}	ΣQ	realizovateľnosť
[ks]		[m]	[m ³ .s ⁻¹]		
2	1	13,01	612,1	612,1	1

Alternatívne riešenie prevádzania prietoku cez PLK a obtoky PLK má maximálnu kapacitu iba $1\,901\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (jedna PLK je mimo prevádzky). Z uvedeného dôvodu pri poklese spádu vody na VEG pod 13 m nie je možné výpadok turbínového prietoku úplne nahradiť cez PLK a obtoky PLK.

Požadovaný prietok $Q_{SK} = 7\,300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ je možné previesť iba spoločne cez Stredovú hať a Hať v inundácii (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.7**). Hať na obtoku sa nemusí zatiaľ otvoriť.

Tab. 6.7 Realizovateľnosť prietokov cez zariadenia stupňa Čunovo

Stredová hať				
hať. polí	v prevádzke	hl. horná	ΣQ	realizovateľnosť
	[ks]	[m n.m.]	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	
3	3	131,10	3960	1

Hať na obtoku				
hať. polí	v prevádzke	hl. horná	ΣQ	realizovateľnosť
	[ks]	[m n.m.]	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	
4	4	131,10	1418,2	1

Hať v inundácií					
hať. polí	v prevádzke	hl. horná	$Q_{1\text{pole}}$	ΣQ	realizovateľnosť
	[ks]	[m n.m.]		[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	
20	20	131,10	244,2	4883,7	1

Vodná elektráreň Čunovo					
turbín	v prevádzke	H	$Q_{1\text{tur}}$	ΣQ	realizovateľnosť
	[ks]	[m]		[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	
4	4	1,42	100	400	0

ΣQ_c	10261,9	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
--------------	---------	------------------------------------

Na stupni Čunovo nebol dosiahnutý minimálny spád 3,5 m a z uvedeného dôvodu nie je možné cez VE realizovať turbínový prietok.

Uvedené riešenie **rozhodovania na základe riadiacej matice a databáz znalostí a dát ES** bolo vyvinuté a overené v prostredí tabuľkového procesora **Microsoft Excel**.

7 MOŽNOSTI REALIZÁCIE ELEKTRONICKEJ VERZIE MANIPULAČNÉHO PORIADKU VS

Manipulačný poriadok VH stavby obsahuje množstvo prevádzkových údajov vodného diela (databáza dát ES) ako aj postupy pre riešenie špecifických prevádzkových situácií (databáza znalostí pre ES).

Stráženie súladu aktuálnych prevádzkových údajov vodného diela s manipulačným poriadkom je pre dispečera zbytočne náročné a pri zložitej schéme vodného diela aj obtiažne. Po zdigitalizovaní manipulačného poriadku, teda jeho prevedení do databáz dát a znalostí, sa môže využiť technológia kontroly súladu s MP označovaná ako „**Watch Dog**“. Takto vytvorený podporný dispečerský systém môžeme považovať za **elektronickú verziu manipulačného poriadku**.

Prepojením expertného systému so systémom merania a zberu prevádzkových údajov na vodnom diele (*external interfaces ES*) sa naplní databáza dát aktuálnymi prevádzkovými údajmi vodnej stavby (Tab. 7.1).

Tab. 7.1 Tabuľka aktuálnych prevádzkových hydraulických údajov SVD-GN

Prevádzkové parametre vodného diela					
$Q_{DEV} [m^3.s^{-1}]$	10 000		objekt	Horná hladina [m n.m.]	Dolná hladina [m n.m.]
$Q_{VEG} [m^3.s^{-1}]$	4000		Stupeň Čunovo	131,5	129,5
$Q_{SKD} [m^3.s^{-1}]$	5630		VEG	130,9	117,25
$Q_{str} [m^3.s^{-1}]$	330				
$Q_{VE \text{ Čunovo}} [m^3.s^{-1}]$	365				

Vytvorenie elektronickej verzie MP si vyžaduje jednoznačné označenie čísla podmienky cez jej štruktúrované číslo napr.:

vd.d.n

kde je **vd** vodné dielo **C** stupeň Čunovo
d druh podmienky **G** vodná elektrárň
 1 vodohospodárska
 2 energetická
 3 plavebná
 4 iný účel
n por. číslo podmienky

Príklad č. 1 (Tab. 7.2) popisuje kontrolu prepúšťania vody cez Po PLK Čunovo, ktorá sa používa až od prietoku Q_{100} v Dunaji (**hodnota MP**):

Funkcia = IF(aktualna hodnota > hodnota MP, 0,1)

Príklad č. 2 popisuje kontrolu turbínovej prevádzky na VEG vo väzbe na požadovaný minimálny hydraulický spád (**hodnota MP**):

Funkcia = IF(aktualna hodnota > hodnota MP, 0,1)

Príklad č. 3 popisuje kontrolu plavebnej prevádzky na stupni Gabčíkovo (dodržanie minimálnej podjazdovej výšky pre plavidlá) vo väzbe na požadovanú maximálnu hodnotu hladiny dolnej vody (**hodnota MP**):

Funkcia = IF(aktualna hodnota < hodnota MP, 0,1)

Nesúlady položky **stav** s výslednou hodnotou **Funkcie** vyhodnotil systém ako chybu a vyznačil konkrétnu položku červenou farbou.

Tab. 7.2 Ukážka technológie Watch Dog

číslo obj.	názov objektu - parameter	stav	riadiaci prevádzkový parameter			Funkcia
			názov	hodnota MP	aktuálna hodnota	
C 1.1	Po PLK - prietok	1	Q_{DEV}	11 000	10 000	0
G 2.1	VEG - spád	1	spád H	13	13,65	1
G 3.1	PLK - podjazd. výška	1	max. hl. v dolnej vode	115,8	117,25	0

Zadávanie prevádzkových podmienok z MP môže byť zložitejšie – vyžadujúce viacej sledovaných parametrov. Tabuľka 7.3 ukazuje príklad pre zadávanie podmienky z MP s dvoma parametrami. Príkladom je zadávanie zhora aj zdola ohraničeného intervalu požadovaného parametra – turbínová prevádzka VE Čunovo je možná iba pri intervale hodnoty spádu 3,5 – 7,1 m.

Príklad č.4 (Tab. 7.3) popisuje kontrolu turbínovej prevádzky VE Čunovo vo väzbe na požadovaný interval využiteľného spádu vody na VE Čunovo (**hodnota MP1, hodnota MP2**):

$$\text{Funkcia} = \text{IF}((\text{akt.hod.1} > \text{hod.MP1}).\text{and.}(\text{akt.hod.2} < \text{hod.MP2}), 0,1)$$

Tab. 7.3 Zadávanie podmienky z MP s dvoma parametrami

číslo obj.	názov objektu - parameter	stav objektu	riadiace prevádzkové parametre						
			názov 1	hodnota MP1	aktuálna hodnota 1	názov 2	hodnota MP 2	aktuálna hodnota 2	Funkcia
C 2.1	Vodná elektrárň	1	spád H	3,5	2	spád H	7,1	2	0

Významným vedľajším prínosom tvorby elektronického MP *je aj odhalenie možných logických alebo hodnotových nezrovnalostí v MP* a ich následné odstránenie v aktualizácii MP.

8 ZÁVER

Prínos práce predstavuje návrh a vytvorenie základných prvkov expertného systému na podporu dispečerského riadenia SVD-GN počas prevádzania povodňových prietokov na základe získaných informácií o:

- priebehu povodňovej situácie – aktuálny prietok v profile Bratislava – Devín a prognózy jeho vývoja,
- aktuálnych prevádzkových vodohospodárskych parametroch SVD-GN (vrátane funkčnosti jednotlivých objektov),
- pripravovanej manipulácii s prietokom cez SVD-GN.

Realizované postupy je možné aplikovať aj iné vodohospodárske sústavy. Pri aplikácii uvedených postupov na ďalšiu VH sústavu bude potrebné zodpovedať aj komplex otázok riešený v tejto práci. Systém riadiacich matíc je úplne všeobecný a nie je závislý od použitého matematického modelu vodohospodárskej sústavy.

Z vygenerovanej **databázy dát ES** (prostriedkami matematického modelovania) a vytvorených **databáz dát a znalostí ES** (elektronický prepis manipulačného poriadku) budú dispečerovi poskytnuté informácie **riadiacim systémom ES** o dopade pripravovanej manipulácie na prevádzkové parametre SVD-GN (vývoj hladín nad a pod VH objektmi) spolu s informáciou o možnosti ich realizovateľnosti objektmi SVD-GN.

V práci riešené otázky a postupy sú **aplikovateľné na ľubovoľné vodné dielo. Naplnenie matice prevádzkových stavov objektov** je nezávislé od použitého matematického modelu. Údaje z modelovania sa získavajú offline, čo umožňuje **použitie zložitých matematických modelov** s presnejšími výsledkami.

9 LITERATÚRA

- Dušíčka, P., Květon, R.: Hydrodynamický model VE Gabčíkovo. In 10 rokov prevádzky VE Gabčíkovo : Gabčíkovo, Slovak Republic, 23.-24.10.2002. Trenčín: Slovenské elektrárne, 2002, s. 285--291.
- Květon, R., Orfánus, M.: Hydroinformatika. Skriptá. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Pripravené na publikovanie 2015
- Možiešik, Ľ. a kol.: Vodohospodársky model prevádzky VD Gabčíkovo. Technická správa. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Katedra Hydrotechniky. 2008
- Vodohospodárska výstavba, štátny podnik: Dočasný manipulačný poriadok pre sústavu vodných diel Gabčíkovo-Nagymaros na území Slovenskej republiky Aktualizácia X. 2015
- Vodohospodárska výstavba, štátny podnik: Dočasný manipulačný poriadok pre sústavu vodných diel Gabčíkovo-Nagymaros na území Slovenskej republiky Aktualizácia IX. 2012
- Výskumný ústav vodného hospodárstva: VD GA, stupeň Čunovo, kalibrácia hydrotechnických objektov. Správa. VÚVH. 2008

Stanislav Kelčík, Ing. PhD., Výskumný ústav vodného hospodárstva, Nábr. Arm. Gen. L. Svobodu 5, 812 49 Bratislava, stanislav.kelcik@vuvh.sk