



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

NÁVRH PRAVIDEL PRO ŘÍZENÍ HYDROENERGETICKÉ FUNKCE VODNÍ NÁDRŽE

THE DESIGN OF A RULES FOR THE HYDROPOWER CONTROL OF A DAM RESERVOIR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Bednář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL MENŠÍK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Martin Bednář
Název	Návrh pravidel pro řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže
Vedoucí práce	Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01). Brno: VUT v Brně, 2006. 120 s.
2. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 02). Brno: VUT v Brně, 2006. 117 s.
3. Starý, M.; Šálek, J.; Kožnárek, Z.; Šoustal, O. Automatizované systémy řízení ve vodním hospodářství. Metodické návody do cvičení a diplomového semináře. 1. vyd. Brno: VUT, 1987. 126 s.
4. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Metodické návody do cvičení. 1. vyd. Brno: VUT, 1987. 67 s.
5. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. 1. vyd. Brno: VUT, 1986. 165 s.
6. Votruba, L.; Broža, V. Hospodaření s vodou v nádržích. 2.přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1980. 443 s.7
7. Votruba, L. Vodohospodářské soustavy. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1979. 465 s.
8. Microsoft Excel (software)
9. Aktuální a historické ceny elektřiny dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektřiny-graf-vyvoje-ceny/>

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Úkolem diplomové práce bude vytvořit algoritmus, pomocí kterého bude možno navrhnout pravidla řízení. Pravidla řízení umožní dosáhnout efektivnějšího využití hydroenergetického potenciálu u nádrží s průtočnou MVE. Vlastní algoritmus bude vytvořen s ohledem na maximalizaci zisku z provozu hydroelektrárny a bude k tomu využít časový průběh ceny elektrické energie na trhu. Algoritmem navržená pravidla budou zjednodušeně otestována ve vybraném období pomocí simulačního modelu.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je vytvořit algoritmus, pomocí kterého bude možno navrhnout pravidla řízení. Pravidla řízení umožní dosáhnout efektivnějšího využití hydroenergetického potenciálu u nádrží s průtočnou MVE. Vlastní algoritmus bude vytvořen s ohledem na maximalizaci zisku z provozu hydroelektrárny a bude k tomu využít časový průběh ceny elektrické energie na trhu. Algoritmem navržená pravidla budou zjednodušeně otestována ve vybraném období pomocí simulačního modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nádrž, malá vodní elektrárna, hydroenergetická funkce, hydroenergetika, zisk, návrh řízení, simulace, simulační model, Mostišť, výkon, energie, elektrická energie

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to create an algorithm by which it will be possible to devise management rules. These management rules will be able to advise a more efficient use of the hydroenergetic potential of reservoirs with run-of-river small hydro. The actual algorithm will be created with a view to maximizing the profit from the operation of the hydropower plant and using the time course of electricity prices on the market. The rules designed by algorithm will be tested in a simplified way in selected period using simulation model.

KEYWORDS

Reservoir, small hydro, hydroenergetic function, hydroenergetic, profit, control design, simulation, simulation model, Mostišť, power, energy, electrical energy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Martin Bednář *Návrh pravidel pro řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže*. Brno, 2019. 63 s., 10 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Návrh pravidel pro řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 7. 7. 2019

Bc. Martin Bednář
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Návrh pravidel pro řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 7. 2019

Bc. Martin Bednář
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu této práce Ing. Pavlu Menšíkovi, Ph. D, za zajímavé téma diplomové práce, jeho odborné vedení, rady a připomínky k řešené problematice.

OBSAH

1 Úvod	10
1.1 Popis nádrže.....	12
1.1.1 Technické parametry nádrže	13
1.1.2 Malá vodní elektrárna	13
1.1.3 Základní hydrologické údaje	14
1.1.4 Pravidla řízení odtoku vody z nádrže.....	16
2 Cíl práce	18
3 Metody	19
3.1 Simulace.....	19
3.2 Simulační model	19
3.3 Řízení odtoku z nádrže	19
3.4 Dispečerský graf	20
3.5 Výpočet výkonu a výroby elektrické energie v MVE	20
4 Vytvoření doplňujících pravidel řízení	21
4.1 Použitá vstupní data.....	21
4.1.1 Cena elektrické energie.....	21
4.1.2 Průtoky	22
4.2 Zavedená zjednodušení.....	22
4.2.1 Zisk z vyrobené elektrické energie	22
4.2.2 Zanedbání ztrát vody z nádrže	23
4.2.3 Odběr vody na úpravnu vody	23
4.2.4 Ostatní odběry.....	24
4.2.5 Jednoleté řízení.....	24
4.2.6 Jalový odtok.....	24
4.2.7 Výpočet výkonu	25
4.3 Analýza průběhu ceny el. energie	25
4.3.1 Analýza vývoje ceny	25
4.3.2 Relativní průměrná hodnota týdne.....	26
4.3.3 Výsledná kategorizace týdne.....	27
4.4 Popis vytvoření simulačního modelu	29

4.4.1	Simulační model pro řízení dle MŘ	29
4.4.2	Simulační model s využitím navrženého pravidla řízení.....	32
4.5	Referenční rok.....	35
4.5.1	Způsob vytvoření referenčního roku	35
4.6	Interpretace výsledků	38
5	Shrnutí výsledků.....	40
5.1	Referenční roky.....	40
5.1.1	2010 – vodný rok ($Q_r = 2,730 \text{ m}^3/\text{s}$).....	40
5.1.2	2009 – vodný rok ($Q_r = 1,812 \text{ m}^3/\text{s}$).....	41
5.1.3	2014 – průměrný rok ($Q_r = 1,532 \text{ m}^3/\text{s}$).....	43
5.1.4	2011 – málo vodný rok ($Q_r = 1,161 \text{ m}^3/\text{s}$).....	45
5.1.5	2015 – suchý rok ($Q_r = 1,005 \text{ m}^3/\text{s}$).....	47
5.1.6	2016 – suchý rok ($Q_r = 0,640 \text{ m}^3/\text{s}$).....	49
5.2	Použití navrženého řízení nezávislou třetí osobou	51
5.2.1	Vyhodnocení.....	54
6	Závěr	56
7	Seznam použitých zdrojů	59
8	Seznam použitých obrázků	60
9	Seznam použitých tabulek	61
10	Seznam příloh	63

1 ÚVOD

Vodní elektrárny si v globální výrobě elektrické energie drží mezi obnovitelnými zdroji s velkým odstupem stále první místo. Patří k ekologicky nejšetrnějším způsobům získávání elektřiny, zejména díky nízké produkci emisí, a proto je vodní energie považována za perspektivní obnovitelný zdroj. Existují státy, které díky vodní energii získávají přes 50 % svých potřeb elektřiny. Vodní elektrárny jsou důležitým prostředkem regulace sítě a v podobě přečerpávacích elektráren i akumulace energie. Přestože přírodní podmínky České republiky umožňují využít sílu vody jen v omezené míře, s rozvojem hydroenergetiky se do budoucna počítá a roste počet zejména malých vodních elektráren.[1]

Hlavním problémem výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů je její neskladovatelnost. U vodního zdroje je možnost uskladnění energie formou akumulace vody v nádrži. Této akumulaci využívají přečerpávací vodní elektrárny, které mají dvě nádrže – horní a dolní. Nádrže jsou spojeny spádovým potrubím s velkým průměrem. Přečerpávací elektrárny pak pracují tak, že v době přebytku elektřiny a její nízké ceny čerpají vodu z dolní nádrže do horní, v době jejího nedostatku a vysoké ceny pak vyrábějí elektřinu prouděním vody z horní do dolní nádrže.[1]

Při využití hydroenergetického potenciálu vodní nádrže s průtočnou vodní elektrárnou se takovéto akumulaci využít nedá. Cílem práce je však myšlenku akumulace energie aplikovat i na nádrž s průtočnou vodní elektrárnou. Čerpání vody do horní nádrže pro akumulaci vody je zde nahrazeno snížením odtoků z nádrže, a tím snížením úbytku vody. V opačném případě se pak odtoky zvýší a využije se potenciál pošetřené vody z období snížených odtoků. Diplomová práce je zaměřena na zvýšení zisku z provozu malé vodní elektrárny (MVE). Navržená doplňující pravidla řízení proto snižují odtoky v období nižší ceny elektrické energie na trhu, a naopak odtoky zvyšují v období ceny vyšší. To zajistí vyšší zisk při využití pošetřené vody v období vyšší ceny elektrické energie na trhu.

V práci je navržen postup umožňující vytvoření doplňujících pravidel řízení. Tyto pravidla jsou optimalizována pro maximalizaci zisku z hydroenergetické funkce vodní nádrže. Zvolenou vodní nádrží pro účely této práce je vodní nádrž Mostiště. Aktuální pravidla řízení VD Mostiště zajišťuje manipulační řád pro VD Mostiště na Oslavě v km 65,948 [2]. Dle stávajícího MŘ je na Mostišti řízen odtok pomocí dvoustupňového dispečerského grafu. Jedním z hlavních účelů VD Mostiště je hydroenergetická funkce. Z tohoto důvodu dle manipulačního řádu je upřednostněn veškerý odtok z nádrže přes MVE až do maximální hlnosti turbíny. Na základě tohoto upřednostnění jsou navržena doplňující pravidla řízení.

Doplňující pravidla jsou navržena formou referenčních roků (viz. kapitola 4.4.2), které jsou optimalizovány s cílem maximalizace zisku z hydroenergetické funkce nádrže. Pro vytvoření referenčních roků je použit simulační model s denním krokem. Pro výpočet

odtoku na MVE pro každý časový krok je použito pravidlo řízení (viz. kapitola 4.5) převzaté z [3]. Výpočet zisku z hydroenergetické funkce probíhá pro každý časový krok pomocí denní ceny elektrické energie.

V praxi lze vyrobenou elektrickou energii prodat třemi způsoby:

- státem garantovaná výkupní cena u stavby v nové nebo ve stávající lokalitě,
- výkup prostřednictvím Zelených bonusů,
- prodejem na velkoobchodním trhu.

Soukromý provozovatel MVE by nejspíše využil možnost státem garantovaného výkupu za cenu stanovenou Energetickým regulačním úřadem, která je pro soukromého provozovatele nejvýhodnější. Práce je ale směřovaná pro provozovatele MVE, kteří jsou rovněž provozovateli distribuční soustavy. Tito provozovatelé pravděpodobně využijí velkoobchodní trh, protože jsou to právě oni, kdo zajišťuje výkup elektrické energie za státem garantovanou cenu. Práce tedy uvažuje s prodejem vyrobené energie na velkoobchodním trhu. Jelikož simulační modely pracují s denním krokem jedná se pak o krátkodobý trh, kde se obchoduje s dodávkou v řádu dní až hodin předem.[4][5]

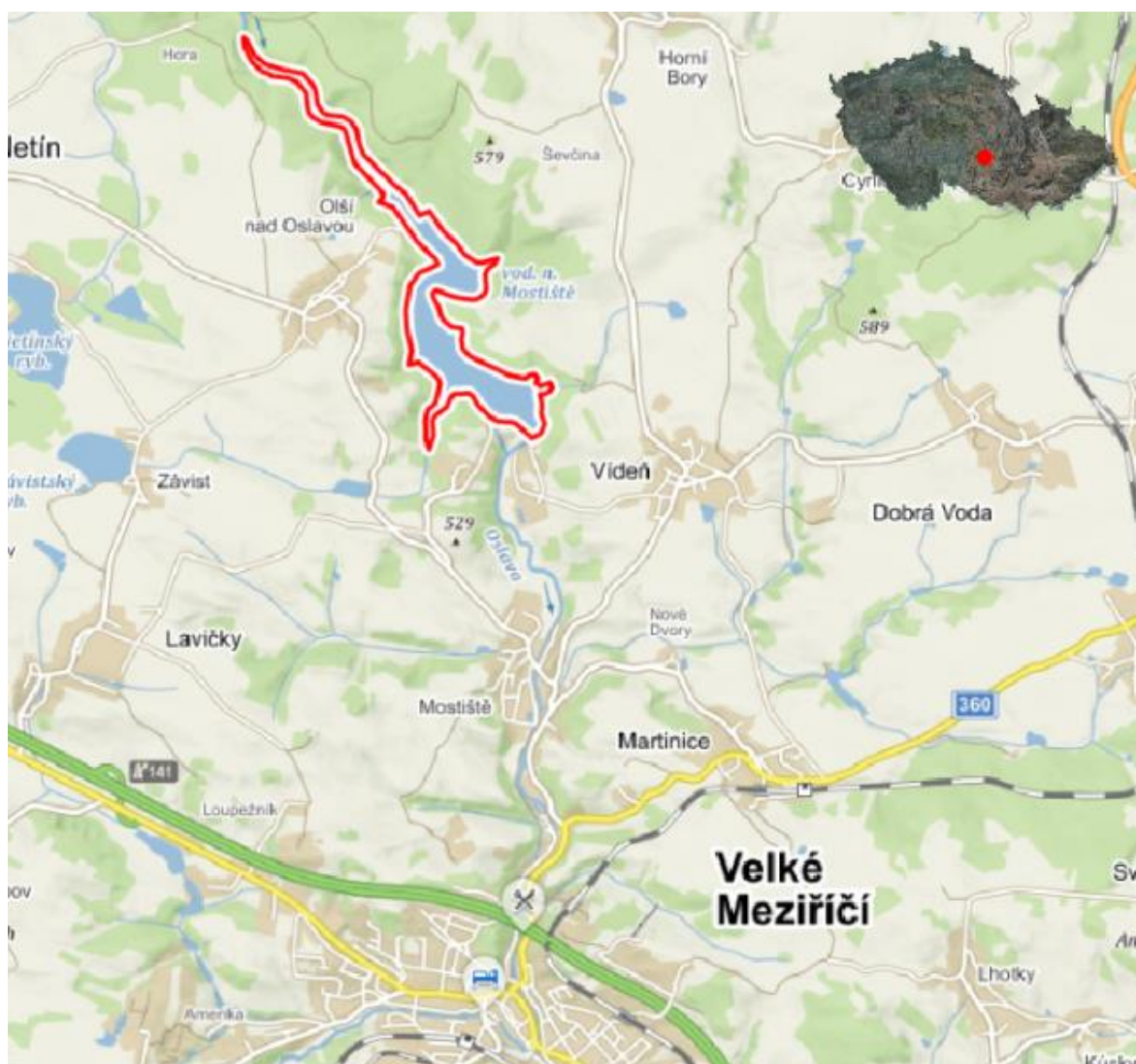
Navržená doplňující pravidla řízení jsou tedy vytvořena na základě zjednodušené analýzy časové řady reprezentující denní vývoj ceny elektrické energie na velkoobchodním trhu. Doplňující pravidla jsou následně otestována dvěma nezávislými osobami na simulačním modelu pro rok 2017. Cílem obou simulací je při využití navržených pravidel dosáhnout vyššího zisku z provozu MVE než při využití pravidel stanovených aktuálním manipulačním řádem.

1.1 POPIS NÁDRŽE

Vodní nádrž Mostiště, zvaná též Mostištská přehradní nádrž, leží na řece Oslavě severně od Velkého Meziříčí. Zemní sypaná hráz nádrže je 292 m dlouhá a je schopna zadržet 11 937 000 m³ vody s plochou hladiny asi 93 ha. Touto kapacitou se nádrž řadí mezi středně velké přehrady v Česku. Správcem této nádrže je Povodí Moravy, s. p.

Nádrž plní hned několik účelů:

- výroba elektrické energie v malé vodní elektrárně,
- snížení povodňových průtoků,
- vodárenský odběr,
- zajištění minimálního průtoku v toku pod nádrží.[2][6][7]



Obr. č. 1 - Situace VN Mostiště

1.1.1 Technické parametry nádrže

Typ hráze:	sypaná kamenitá
Těsnění:	návodní sprašové těsnění
Výška hráze:	28,70 m
Šířka koruna:	5,80 m
Délka hráze v koruně:	292,00 m
Typ bezpečnostního přelivu:	boční hrazený
Kóta přelivu:	477,60 m n. m.
Šířka přelivu:	55,30 m
Hladina prostoru stálého nadržení M_s :	458,60 m n. m.
Objem prostoru stálého nadržení V_s :	1,045 mil. m ³
Hladina zásobního prostoru M_z :	476,90 m n. m.
Objem zásobního prostoru V_z :	9,339 mil. m ³
Hladina retenčního prostoru ovladatelného:	477,60 m n. m.
Objem retenčního prostoru ovladatelného:	0,944 mil. m ³
Hladina retenčního prostoru neovladatelného:	478,64 m n. m.
Objem retenčního prostoru neovladatelného:	0,944 mil. m ³
Celkový objem nádrže:	11,937 mil. m ³ [2]

1.1.2 Malá vodní elektrárna

Podzemní průtočná elektrárna umístěná v podzemní strojovně spodní výpusti slouží k energetickému využití průtoků do max. 1,5 m³/s při spádu minimálně 11,3 m a maximálně 32,2 m. Maximální výkon turbíny je 400 kW při jmenovitých otáčkách $n = 1000$ ot./min. Turbína je přímo spojená s asynchronním generátorem.

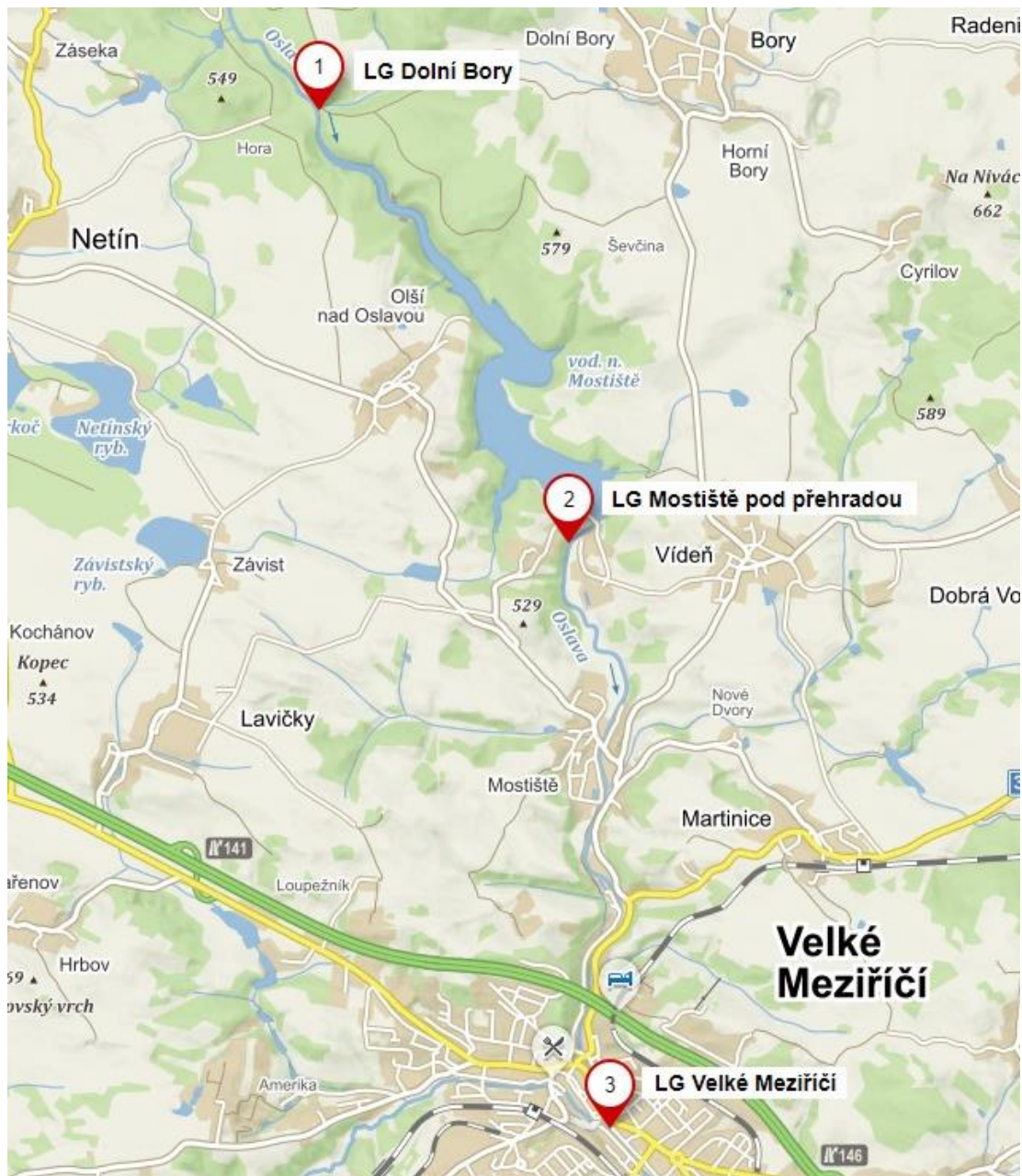
Vtok do přívaděcího potrubí DN 900 k turbíně je situován v pravém boku tlakové štoly o průměru 3 m – před vlastním vtokem do výpustných uzávěrů. Z důvodu odběru čistější vody je vtok veden z horní poloviny štoly.

V případě vypadnutí soustrojí (buď následkem ztráty napětí, nebo poruchy soustrojí) se otevře jalová výpust. Po opětovném uvedení turbíny do chodu se samočinně jalová výpust uzavře. Jalová výpust umožňuje vypouštění průtoků do 1,5 m³/s v případě poruchy nebo oprav přívaděcího potrubí k turbíně, jejího uzávěru nebo vlastní turbíny.[2]

Počet turbín:	1x
Typ turbíny:	Kaplanova – vertikální
Výkon elektrárny:	400kW
Hltnost turbíny:	1,5 m ³ /s
Provozovatel:	Czech Hydro s.r.o.

1.1.3 Základní hydrologické údaje

Hydrologické údaje jsou převzaty z manipulačního řádu VD Mostiště z roku 2013.



Obr. č. 2 - Přibližná poloha limnigrafických stanic

Tab. 1 - Základní hydrologické údaje [2]

Tok: O S L A V A	P R O F I L		
	LG Dolní Bory (nad přehradou)	LG Mostiště pod přehradou	LG Velké Meziříčí
Dlouhodobý průměrný roční průtok Q_a	1,425 m ³ /s	1,390 m ³ /s	2,500 m ³ /s
Průměrná roční srážka	669 mm	668 mm	645 mm
Specifický odtok	6,594 l/s/km ²	6,042 l/s/km ²	5,700 l/s/km ²
Plocha povodí P	216,11 km ²	222,94 km ²	439,00 km ²
Hydrologické pořadí	4-16-02-021	4-16-02-021	4-16-02-047

Tab. 2 - N-leté průtoky [2]

N - let	P R O F I L				
	LG Dolní Bory (nad přehradou)	Hráz VD Mostiště (neovlivněné průtoky)		LG Mostiště pod přehradou	LG Velké Meziříčí
	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	V [m ³]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]
1	16,0	16,0	3,00	13,0	33,0
2	23,0	23,5	4,86	22,0	46,0
5	34,0	34,5	7,67	31,0	65,0
10	43,0	44,0	9,85	38,0	80,5
20	53,0	54,5	13,00	46,0	97,5
50	68,0	69,5	17,50	65,0	121,0
100	80,0	82,0	20,50	-	140,0
200	-	97,0	25,00	-	-
500	-	118,0	30,00	-	-
1000	-	138,0	36,60	-	-

Tab. 3 - M-denní průtoky [2]

m - dní	P R O F I L		
	LG Dolní Bory (nad přehradou)	LG Mostiště pod přehradou	LG Velké Meziříčí
	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]
30	3,520	3,500	6,020
90	1,640	1,570	2,690
180	0,790	0,790	1,350
270	0,389	0,410	0,780
330	0,257	0,250	0,510
355	0,131	0,146	0,270
364	0,054	0,062	0,094

1.1.4 Pravidla řízení odtoku vody z nádrže

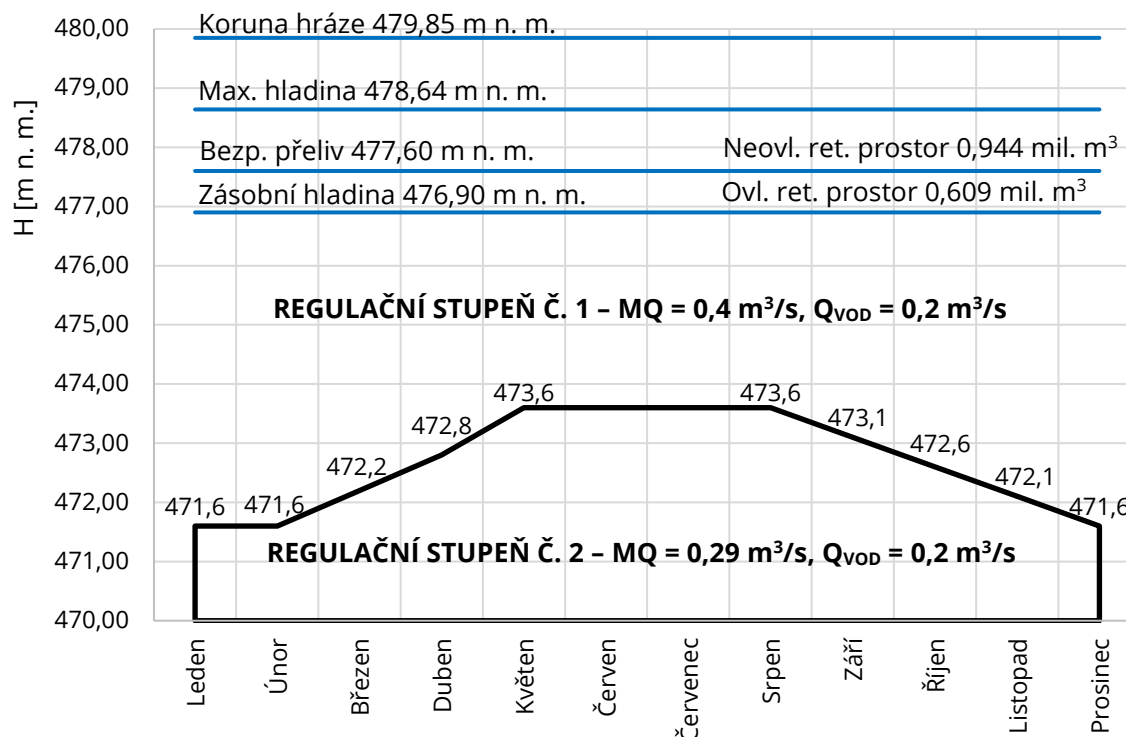
Způsob hospodaření s vodou a manipulace na vodním díle jsou podrobně popsány v Manipulačním řádu pro VD Mostiště na Oslavě v km 65,948 [2]. Obecně je při manipulaci snahou, aby za normálních okolností a provozních podmínek byly dodržovány v povolených tolerancích hladiny rozdělující prostory nádrže. Pro VN Mostiště jsou mezní hodnoty a tolerance shrnuty v následující tabulce.

Tab. 4 - Mezní hodnoty a tolerance [2]

Hladina stálého nadržení	458,60 m n. m. ± 15 cm
Maximální zásobní hladina	476,90 m n. m. ± 15 cm
Maximální hladina ovladat. retenč.	477,60 m n. m. ± 10 cm
Maximální hladina	478,64 m n. m.
Minimální průtok v toku pod VD	0,12 m ³ /s

Prostor stálého nadržení musí zůstat trvale naplněn z důvodů hygienických a zachování biologického života v nádrži. Využívání vody z pro účely, ke kterým slouží zásobní prostor se nepřipouští.

Hospodaření s vodou v zásobním prostoru nádrže se řídí dvoustupňovým dispečerským grafem. Vodárenský odběr se odebírá v zaručených průměrných měsíčních množstvích, tzn. že může v průběhu dne i měsíce kolísat.



Obr. č. 3 - Dispečerský graf VD Mostiště, vzor převzat z [2]

Retenční prostor se smí plnit pouze v případě průchodu povodňových průtoků a při proplachování hladiny.[2]

Tab. 5 - Dvoustupňový dispečerský graf (tabelárně) [2]

Měsíc	REGULAČNÍ STUPEŇ č. 1			REGULAČNÍ STUPEŇ č. 2		
	Kóta regulační křivky	Odběr Q_{vod}	Odtok do toku MQ	Kóta regulační křivky	Odběr Q_{vod}	Odtok do toku MQ
	m n. m.	m ³ /s	m ³ /s	m n. m.	m ³ /s	m ³ /s
Leden	476,90	0,200	0,400	471,60	0,200	0,290
Únor	476,90	0,200	0,400	471,60	0,200	0,290
Březen	476,90	0,200	0,400	472,20	0,200	0,290
Duben	476,90	0,200	0,400	472,80	0,200	0,290
Květen	476,90	0,200	0,400	473,60	0,200	0,290
Červen	476,90	0,200	0,400	473,60	0,200	0,290
Červenec	476,90	0,200	0,400	473,60	0,200	0,290
Srpen	476,90	0,200	0,400	473,60	0,200	0,290
Září	476,90	0,200	0,400	473,10	0,200	0,290
Říjen	476,90	0,200	0,400	472,60	0,200	0,290
Listopad	476,90	0,200	0,400	472,10	0,200	0,290
Prosinec	476,90	0,200	0,400	471,90	0,200	0,290

2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je vytvořit obecný postup umožňující navrhnout doplňující pravidla řízení, která umožní při provozu nádrže s průtočnou malou vodní elektrárnou (MVE) dosáhnout efektivnějšího využití hydroenergetického potenciálu nádrže.

Celkový postup umožňující navrhnout doplňující pravidla řízení bude vycházet ze snahy maximalizovat zisk z provozu hydroelektrárny. Teoretický zisk z provozu hydroelektrárny bude zjednodušeně odhadován z historické časové řady popisující vývoj ceny elektrické energie na trhu.

K vytvoření postupu (algoritmu) je využito tabulkového procesoru Microsoft Excel. V Excelu jsou běžně dostupné funkce a nástroje použity pro zjednodušenou analýzu vývoje ceny na trhu a ke zpracování vstupních dat popisující parametry nádrže a MVE. Excel je rovněž použit pro vytvoření simulačního modelu VD Mostiště.

Ověření navržených doplňujících pravidel řízení hydroenergetické funkce VD Mostiště je provedeno nezávislou osobou s využitím simulačního modelu VD Mostiště. Následně je provedeno vyhodnocení úspěšnosti řízení.

3 METODY

V této kapitole jsou zjednodušeně popsány jednotlivé metody, které byly použity pro dosažení cílů této diplomové práce.

3.1 SIMULACE

Simulaci lze definovat jako techniku, která umožňuje vyhodnotit následky daného rozhodnutí, aniž by došlo k jeho uskutečnění v praxi. Ve vodním hospodářství se simulace týká především problematiky řešení zásobní funkce nádrže. Lze ji popsat jako matematickou techniku, která napodobuje posloupnosti algoritmů provozu nádrže v daném časovém úseku, při zadaných počátečních a okrajových podmínkách.

V rámci simulace provozu nádrže se může sledovat průběh kritériální funkce. Touto funkcí mohou být technické nebo ekonomické veličiny, příp. jejich kombinace. Tímto kritériem může být například zabezpečení, či náklady na realizaci. V této práci byl sledovaným kritériem celkový zisk z vyrobené elektrické energie na MVE.[8]

3.2 SIMULAČNÍ MODEL

Jedná se o optimalizační metodu, ve které simulujeme provoz nádrže pro každou změnu vstupního parametru. Tímto způsobem dostaneme několik variant, ve kterých vyhodnocujeme sledované kritérium. Vyhodnocením se rozumí rozdíl mezi vypočtenou a požadovanou hodnotou. Tento rozdíl se snažíme minimalizovat. Z vyřešených variant pak vybereme tu, která se se zadanou předností shoduje s požadovanou hodnotou kritéria.[8]

3.3 ŘÍZENÍ ODTOKU Z NÁDRŽE

Řízením odtoku rozumíme cílevědomě prováděnou redistribuci odtoku v čase, jejímž účelem je přizpůsobit odtokový režim potřebám společnosti. Tuto činnost provádíme proto, že přirozené rozdělení odtoku v průběhu sledovaného období nemusí a obecně ani nemůže být v souladu s potřebami plánovitě řízené činnosti společnosti, protože je výsledkem fungování složitého přírodního mechanismu nezávislého na člověku.

Při řízení odtoku se v obvyklých případech snažíme o snižování nejvyšších a zvyšování nejnižších průtoků. Tímto tak získáme z přirozeného variačního rozpětí odtoku požadované variační rozpětí. U přirozeného variačního rozpětí kolísá velikost odtoku mezi minimální a maximální hodnotou odtoku. Kdežto u požadovaného variačního rozpětí se velikost odtoku pohybuje mezi hodnotou nalepšeného odtoku (požadované minimum) a neškodného odtoku (požadované maximum).

Řízení odtoku však nemusí být pouze o vyrovnání odtoku, ale i jeho redistribuce v čase a prostoru. Této „rozdělovací“ funkce se využívá například při nárazovém nalepšování pro plavbu, závlahy nebo při denní regulaci pro špičkové vodní elektrárny.[8]

3.4 DISPEČERSKÝ GRAF

Dispečerské řízení odtoku je obecně účelné u všech nádrží (jak pro zásobní, tak i ochrannou funkci). Může být vhodné i pro dodržení spádových poměrů u energeticky využívaných nádrží, dodržování snížené nebo zvýšené hladiny pro rekreaci v určitém období apod. V České republice je dispečerské řízení používáno u větších a významných nádrží při odtoku vody ze zásobního prostoru. Jelikož nádrž Mostišťe se řadí mezi středně velké vodní nádrže s hydroenergetickým potenciálem, má tato nádrž svůj dispečerský graf. V rámci této práce jsou navržena pravidla řízení, která vycházejí právě z tohoto dispečerského grafu.[8]

3.5 VÝPOČET VÝKONU A VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE V MVE

Výpočet výkonu malé vodní elektrárny je počítán dle obecného vztahu pro výkon hydroenergetického zdroje:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_E \cdot \eta_c, \quad (3.1)$$

kde P je výkon hydroenergetického zdroje, Q značí průtok vodním strojem, H udává čistý (užitný) spád a η_c představuje celkovou účinnost zařízení.

V hydroenergetické praxi rozlišujeme v podstatě dva druhy spádů – hrubý celkový spád H_b a užitný (čistý) spád H .

Hrubý spád H_b je celkový statický spád mezi dvěma uvažovanými profily úseku, který chceme energeticky využít. Je dán rozdílem hladin v těchto profilech při nulovém průtoku vodní elektrárnou, takže jej lze na hotovém díle určit nivelací.

Čistý spád H je výškový rozdíl mezi čarami energie těsně před vodním motorem a za ním. Je to hrubý spád H_b , od něhož jsou odečteny hydraulické ztráty v přivaděči a odpadu, které se nezahrnují do účinnosti turbíny.

Vynásobením výkonu hydroenergetického zdroje časem získáme vyrobenou elektrickou energii:

$$E = P \cdot t, \quad (3.2)$$

kde E je vyrobená elektrická energie za takový časový úsek, pro jaký je určen užitný (čistý) spád a t značí počet hodin v daném časovém úseku.[9]

4 VYTVOŘENÍ DOPLŇJÍCÍCH PRAVIDEL ŘÍZENÍ

V kapitole je podrobně popsáno vytvoření algoritmu, pomocí kterého bude možno navrhnout doplňující pravidla řízení. Navržená pravidla umožní stanovit velikost odtoků na vodní elektrárnu s cílem maximalizace zisku z vyrobené energie.

V programu Microsoft excel je vytvořená zjednodušená analýza vývoje ceny na trhu, díky které se provede kategorizace týdnů na základě jejich potenciální ziskovosti. Díky tomuto zatřídění a s využitím nového pravidla řízení je docíleno vyššího zisku. Teoretický zisk je počítán pomocí vytvořeného simulačního modelu, který simuluje provoz vodní nádrže Mostiště. Snahou pak bylo navrhnout doplňující pravidla řízení odtoku z nádrže pomocí subjektivní optimalizace s cílem navýšit zisk z vyrobené elektrické energie v MVE.

Navržené řízení je prezentováno grafickou a tabulkovou formou pro zvolené referenční roky (viz. kap. 4.5), které jsou využity jako vzor pro samotné řízení odtoku z nádrže.

4.1 POUŽITÁ VSTUPNÍ DATA

V prvním kroku bylo provedeno zpracování vstupních časových řad, jimiž jsou reprezentovány průměrné denní ceny za elektrickou energii a průměrné denní přítoky do vodní nádrže Mostiště.

4.1.1 Cena elektrické energie

Malou vodní elektrárnu provozuje společnost Czech Hydro, s.r.o. (dříve ENERGO – PRO, a.s.). Od provozovatele MVE se bohužel nepodařilo získat informace popisující za jakých podmínek a cen prodávají vyrobenou elektrickou energii. Jedná se totiž o neveřejné interní informace společnosti. Z tohoto důvodu byla potřebná data převzata z webu <http://www.kurzy.cz>. Web poskytuje informace o aktuálních kurzech měn, dále o trhu s akcemi na největších a nejvýznamnějších burzách, podílových fondech a vývoji cen jednotlivých komodit. Pro účel diplomové práce byl převzat vývoj ceny pouze jedné komodity – elektřiny.

Na těchto stránkách lze zobrazit denní, měsíční i roční průměrná cena za elektřinu v zadaných datech. Cena elektřiny je uváděna za jednu megawatthodinu (MWh), či kilowatthodinu (kWh) a to v různých měnách. Ceny elektřiny na stránkách <http://www.kurzy.cz> jsou převzaty z komoditní burzy Power Exchange Central Europe, a.s. Jedná se o společnost specializující se na energetické trhy střední a východní Evropy. Hlavní měnou těchto cen je tedy euro (EUR). V práci se však počítá s cenami v českých korunách (CZK). Přepočítání je prováděno automaticky na zmíněných stránkách pomocí aktuálního kurzu EUR/CZK dle České národní banky (ČNB).[10][11]

Získanou časovou řadu bylo nutné doplnit o chybějící hodnoty. Denní hodnoty ceny elektrické energie chyběly ve dnech, kdy nelze s komoditou obchodovat (víkendy a svátky). Pro dny s chybějící cenou byla použita cena nejbližšího předchozího dne.

4.1.2 Průtoky

Simulační modely v této práci jsou sestaveny s denním krokem. Proto bylo potřeba zajistit průtokovou řadu průměrných denních průtoků. Požadovanou průtokovou řadu poskytl Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno. Průtoková řada průměrných denních průtoků (přítok do nádrže Mostiště) byla odvozena z měření na limnigrafické stanici Dolní Bory – Olší nad přehradou.

4.2 ZAVEDENÁ ZJEDNODUŠENÍ

Problematika této práce se zabývá docílením vyššího zisku z hydroenergetické funkce nádrže s ohledem na vývoj ceny za elektřinu na trhu. Již z tohoto vyplývá, že se jedná o velice komplexní problém. Tím se myslí zapojení a kooperace několika vědních oborů, jako jsou třeba hydrologie, která řeší odtokové poměry v povodí a tím i přítoky do nádrže nebo ekonomika, díky níž jsme schopni pozorovat prvky ovlivňující vývoj ceny elektřiny na trhu.

Už samotný vývoj ceny elektrické energie na trhu je velice složitý proces, který je ovlivněn nespočtem různých vlivů, jako jsou například: různé způsoby výroby elektřiny, sezónnost využívání elektřiny, krátkodobé a neočekávané výpadky ve výrobě, dále také i ekonomické a politické situace ve světě. Z těchto důvodů se v diplomové práci zavedla určitá zjednodušení, která snižují komplexnost celé problematiky.

4.2.1 Zisk z vyrobené elektrické energie

Výkon z hydroenergetické funkce MVE je získáván dle rovnice (3.1) a následně přepočítán na vyrobenou energii za den E_d pomocí rovnice (3.2). Výsledný denní zisk Z_d je vypočten dle následující rovnice:

$$Z_d = E_d \cdot C_d \quad (4.1)$$

kde C_d je aktuální cena za jednotku vyrobené energie pro konkrétní den (časový krok). Jakým způsobem a za jakých podmínek provozovatel MVE Mostiště nakládá s vyrobenou energií není bohužel známo – jedná se o neveřejné informace. Proto se v práci uvažuje s denním prodejem vyrobené elektrické energie za aktuální cenu elektřiny C_d na trhu v daný den (krátkodobý velkoobchodní trh). Při použití aktuální ceny elektřiny C_d je vhodné denní zisk Z_d spíše označovat jako teoretický denní zisk TZ_d . Celkový teoretický zisk CTZ za sledované období získáme pomocí rovnice:

$$CTZ = \sum_{i=1}^n TZ_{d,i}, \quad (4.2)$$

kde i udává pořadí časového kroku ve sledovaném období (den v daném roce) a n je počet uvažovaných dnů v daném roce.

Celkový teoretický zisk $CTZ_{návrh}$ získaný z navrženého doplňujícího řízení za pozorované období je porovnávám s celkovým teoretickým ziskem $CTZ_{MŘ}$, který je získán z řízení vycházejícího z pravidel uvedených v manipulačním řádu za stejné období. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami představuje navýšení teoretického zisku ΔTZ , který se snažíme maximalizovat – viz. rovnice:

$$[\Delta TZ = CTZ_{návrh} - CTZ_{MŘ}] \rightarrow MAX \quad (4.3)$$

4.2.2 Zanedbání ztrát vody z nádrže

V rámci řízení dochází ke ztrátám vody z nádrže, kterým nelze zabránit. Konkrétně se jedná o výpar z vodní hladiny, netěsnosti uzávěrů, průsak vody hrází a do podloží. Objem vody, který odtéká z nádrže vlivem těchto ztrát je více, či méně závislý na poloze hladiny v nádrži.

CTZ v obou simulačních modelech mohou být mezi sebou porovnávány pouze pokud je simulace provedena pro stejné období. Jedná se však o rozdílná pravidla řízení, při kterých dochází k různému kolísání hladiny v nádrži. Z toho plynou i rozdílné ztráty vody. Jedná se však o stejnou vodní nádrž a při delším pozorovaném období (1 rok a více) lze tyto ztráty v obou simulačních modelech označit za téměř shodné. Z použití rovnice (4.3) plyne, že ztráta zisku vlivem ztráty vody z nádrže bude mít téměř stejný vliv na $CTZ_{návrh}$ i $CTZ_{MŘ}$ a vzájemně se pak nuluje. Pro urychlení a usnadnění výpočtů v simulačních modelech jsou tedy tyto ztráty vody z nádrže zanedbány.

4.2.3 Odběr vody na úpravnu vody

Jedním z hlavních účelů nádrže Mostiště je zásobování pitnou vodou. Dle manipulačního řádu je odběr na úpravnu vody pro skupinový vodovod Velké Meziříčí – Třebíč stanoven na měsíční průměrné maximum 0,2 m³/s. Jelikož se jedná o měsíční průměr, může tedy odběrné množství kolísat v rámci hodin, dní i týdnů. Změnu odběrného množství si určuje provozovatel úpravní vody dle potřeby tak, aby nepřekročil stanovený měsíční průměr. Protože se jedná o operativní změny v odběru vody, uvažujeme v rámci simulačních modelů konstantní odběr v každém časovém kroku, a to o velikosti 0,2 m³/s.

Vodovodní odběry jsou uspořádány etážovitě – první na kótě 467,00 m n. m., druhý na kótě 462,00 m n. m. a třetí na kótě 456,60 m n. m. Nejnižší odběrné potrubí se nachází pod hladinou stálého nadržení nádrže Mostiště, tj. 458,60 m n. m. Při simulaci byla jedna z podmínek nezasahovat při navrženém řízení do prostoru stálého nadržení. Na základě této podmínky se tedy uvažuje, že stanovený odběr bude vždy zajištěn.[2]

4.2.4 Ostatní odběry

Dle manipulačního řádu vodní nádrže Mostiště jsou kromě vodárenského odběru provozovány i další dva odběry pro rybník Starý a Rybářství Velké Meziříčí, a.s. Tato odběrná místa však nejsou řešena v místě nádrže, ale jako samostatné odběrné objekty pod nádrží na toku Oslava. Jedná se o odběry k provozu sádek. Tyto odběry jsou velice proměnné a jsou povoleny pod podmínkou, že pod odběrným místem bude zachován minimální asanační průtok $0,110 \text{ m}^3/\text{s}$. [2]

Jelikož se nejedná o povinné odběry, které bychom museli dodržet, v rámci výpočtů nejsou uvažovány. Nicméně při výpočtech je možnost, kromě vodárenského odběru, zadat i odběry ostatní. Aby však nedošlo ke zesložitění výpočtů, lze tyto odběry zadat pouze jako konstantní denní hodnotu odběru v m^3/s .

4.2.5 Jednoleté řízení

Při návrhu doplňujících pravidel řízení odtoku z nádrže pro maximalizaci navýšení teoretického zisku ΔTZ je pracováno s tzv. referenčními roky (více v kap. 4.5). Jedná se o kalendářní roky, ve kterých optimalizujeme odtok z nádrže s ohledem na vyšší zisk z hydroenergetické funkce, ale i s ohledem na hladinu. Použité simulační modely pro optimalizaci vychází z plné nádrže, a proto je taky v hodné mít na konci roku nádrž opět plnou. Takovéto řízení nádrže je označováno jako roční. Požadovaný roční odteklý objem vody tedy nepřesahuje přitekly objem vody v žádném roce. Toto pravidlo však nelze dodržet v případě velmi suchého roku, kdy jsou přítoky do nádrže tak malé, že i při vypouštění stanovených minimálních odtoků nedochází k plnění nádrže. U takového roku bylo cílem dosáhnout optimalizací vyššího zisku rovněž i stejnou koncovou hladinu v nádrži jako při řízení dle stávajících pravidel z manipulačního řádu.

4.2.6 Jalový odtok

V manipulačním řádu VN Mostiště je stanoveno udržovat hladinu v nádrži na kótě zásobního prostoru, tj. 476,90 m n. m. V rámci simulačního modelu je tato hladina udržována jako maximální. Pokud by přítok do nádrže vedl k nárůstu hladiny i navzdory maximálnímu odtoku na turbínu, rozdíl mezi přítokem a odtokem je potom z nádrže vypuštěn jako odtok jalový. Tento jalový odtok v sobě zahrnuje veškerý odtok, který by způsobil navýšení hladiny v nádrži nad úroveň zásobního prostoru. V simulačním modelu se tedy neuvažuje s kapacitou spodních výpustí ani s nárůstem hladiny, při kterém by došlo k zapojení bezpečnostního přelivu.

Pokud bude přítok vyšší než odtok vedený na turbínu, můžeme nárůstu hladiny využít až do výše maximálního hrubého spádu, který je daný výrobcem turbíny. Neuvažováním navýšení hladiny nad kótu 476,90 m n. m. se však této možnosti vzdáváme vůči zjednodušení a urychlení výpočtu.

4.2.7 Výpočet výkonu

Pro výpočet výkonu pomocí rovnice (3.1) je zapotřebí znát čistý spád. Čistý spád je v podstatě hrubý spád očištěný o veškeré ztráty, které nejsou započítány do účinnosti turbíny. Jedná se například o ztráty třením v přivaděči, ztráty na česlích, ztráty na vtoku nebo ztráty (účinnost) generátoru.

Jelikož je v práci zavedeno několik zjednodušení, která ovlivňují přesnost výsledků, můžeme si tedy v rámci dalšího zjednodušení výpočtu dovolit použít pro výpočet výkonu hrubý spád namísto čistého. Hrubý spád je vypočítávám pro každý časový krok simulačního modelu jako rozdíl hladiny v nádrži (před turbínou) a hladiny v odpadní štolě (za turbínou).

Ve výkresové dokumentaci, která je součástí manipulačního řádu VD Mostiště, je uvedena hladina v odpadní štolě za turbínou, které je dosaženo při vypouštění maximálního odtoku přes turbínu (tj. 1,5 m³/s). Poloha hladiny za turbínou je získávána interpolací v závislosti na průtoku turbínou. Rozdílem mezi touto hladinou a aktuální polohou hladiny v nádrži je pak dopočítáván hrubý spád pro výpočet výkonu.

4.3 ANALÝZA PRŮBĚHU CENY EL. ENERGIE

V kapitole je podrobně popsána zjednodušená analýza a zpracování časové řady reprezentující vývoj ceny elektřiny na trhu. Vstupní data tvoří devítiletá časová řada denních cen elektřiny v letech 2008 až 2016. Část analýzy byla převzata z [3], kde se však pracovalo s jiným rozložením roku (viz. 4.3.1), a proto se musela upravit.

4.3.1 Analýza vývoje ceny

Převzatá část analýzy pracuje s upraveným rokem. Rok je zde rozdělen do 13 „měsíců“ po 4 týdnech. Toho bylo docíleno zavedením zjednodušení, které zkrátilo jednotlivé roky o týdny, které nebyly stoprocentně součástí daného roku (např. 1. 1. bylo ve středu, tzn. že pondělí a úterý spadá do minulého roku). Zkrácením bylo dosaženo stejné délky každého roku ve sledovaném období. V této práci se kalendářní rok neupravuje. V rámci analýzy je ale nutné, aby jednotlivé analyzované roky měly stejnou délku. Proto je potřeba zmíněné „přechodné“ týdny eliminovat. Toho je docíleno využitím rozdělení roku na 52 (příp. 53) kalendářních týdnů, kdy se v „přechodných“ týdnech zahrnují do výpočtu i hodnoty ceny elektrické energie z předchozího nebo následujícího roku.

Tab. 6 - Ukázka "přechodného" týdne

Rok	2013							2014						
Týden	52							1						
Den	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N
C _{d,i} [tis. Kč]	0.982	0.982	0.982	0.982	0.980	0.980	0.980	0.972	0.969	0.969	0.962	0.969	0.969	0.969

Následně se každý i -tý den v roce ohodnotil relativní hodnotou (vahou) R_d v intervalu $(0;1)$, která vyjadřuje zajímavost denní ceny elektřiny vzhledem k maximální a minimální denní ceně elektřiny v daném roce. Pro každý rok ve sledovaném období se stanovila minimální denní cena $C_{d,MIN}$ a maximální denní cena $C_{d,MAX}$.

$$C_{d,MIN} = \text{MIN} \{C_{d,i}; C_{d,i+1}; \dots; C_{d,n}\} \quad (4.4)$$

$$C_{d,MAX} = \text{MAX} \{C_{d,i}; C_{d,i+1}; \dots; C_{d,n}\} \quad (4.5)$$

$$R_{d,i} = \frac{C_{d,i} - C_{d,MIN}}{C_{d,MAX} - C_{d,MIN}} \quad (4.6)$$

Z rovnice (4.6) vyplývá, že hodnotou $R_d = 0$ je ohodnocena $C_{d,MIN}$ a naopak $C_{d,MAX}$ je ohodnocena vahou $R_d = 1$. R_d pak relativně vyjadřuje navýšení aktuální C_d vzhledem k minimální ceně v daném roce. Čím blíže je R_d hodnotě 1, tím více je pro nás cena z pohledu zisku zajímavější.

Tab. 7 – Ukázka přiřazení váhy R_d

Rok	2013							2014						
Týden	52							1						
Den	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N
$C_{d,i}$ [tis. Kč]	0.982	0.982	0.982	0.982	0.980	0.980	0.980	0.972	0.969	0.969	0.962	0.969	0.969	0.969
$R_{d,i}$	0.309	0.309	0.309	0.309	0.300	0.300	0.300	0.264	0.255	0.820	0.733	0.811	0.811	0.811

4.3.2 Relativní průměrná hodnota týdne

V rámci zjednodušení výpočtu a manipulace na vodním díle se pracuje s týdenní změnou odtoku, tzn. že hodnota odtoku je konstantní pro celý kalendářní týden. Z tohoto důvodu se provedlo ohodnocení jednotlivých kalendářních týdnů vahou R_t . Hodnota R_t byla stanovena aritmetickým průměrem relativních hodnot R_d v každém týdnu.

$$R_{t,i} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 R_{d,i} \quad (4.7)$$

Tab. 8 – Ukázka přiřazení váhy R_t

Rok	2013							2014						
Týden	52							1						
Den	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N
$C_{d,i}$ [tis. Kč]	0.982	0.982	0.982	0.982	0.980	0.980	0.980	0.972	0.969	0.969	0.962	0.969	0.969	0.969
$R_{d,i}$	0.309	0.309	0.309	0.309	0.300	0.300	0.300	0.264	0.255	0.820	0.733	0.811	0.811	0.811
$R_{t,i}$	0.305							0.643						

Tímto způsobem byl ohodnocen každý kalendářní týden v daném roce. Při devítiletém období tím získáváme 9 hodnot pro každý kalendářní týden (1–52). Během

sledovaného období se vyskytly dva roky přestupné, z nichž se získaly pouze dvě hodnoty R_t pro 53. kalendářní týden.

4.3.3 Výsledná kategorizace týdne

Po přiřazení váhových hodnot R_t všem týdnům ve sledovaném období nebylo možné vyhodnotit jednotlivé týdny z pohledu potenciální ziskovosti, protože rozložení relativních vah R_t bylo nejednoznačné. Proto se z těchto hodnot stanovil aritmetický průměr $\overline{R}_{t,j}$.

Tab. 9 - Ukázka stanovení výsledné váhy R_t pro prvních 10 týdnů

Rok\Týden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2008	0.214	0.260	0.273	0.179	0.204	0.197	0.175	0.193	0.271	0.256
2009	0.914	0.881	0.742	0.676	0.697	0.656	0.626	0.406	0.196	0.270
2010	0.846	0.613	0.497	0.539	0.425	0.386	0.353	0.318	0.292	0.171
2011	0.329	0.273	0.102	0.049	0.141	0.084	0.146	0.287	0.244	0.267
2012	0.850	0.759	0.593	0.669	0.772	0.689	0.673	0.809	0.792	0.652
2013	0.951	0.961	0.812	0.628	0.571	0.635	0.674	0.690	0.677	0.580
2014	0.643	0.719	0.856	0.961	0.909	0.950	0.953	0.883	0.614	0.748
2015	0.475	0.747	0.770	0.748	0.771	0.826	0.897	0.866	0.841	0.777
2016	0.306	0.211	0.166	0.168	0.123	0.043	0.019	0.030	0.025	0.068
Týden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\overline{R}_{t,i}$	0.614	0.603	0.535	0.513	0.513	0.496	0.502	0.498	0.439	0.421

Po stanovení aritmetického průměru $\overline{R}_{t,i}$ pro každý kalendářní týden je již možné jednotlivé týdny kategorizovat z pohledu potenciální ziskovosti. Byly zvoleny celkem 4 kategorie: vysoce podprůměrná, podprůměrná, nadprůměrná a vysoce nadprůměrná. Hranice intervalů pro jednotlivé kategorie se odvíjejí od průměrné hodnoty \overline{R} za celé období.

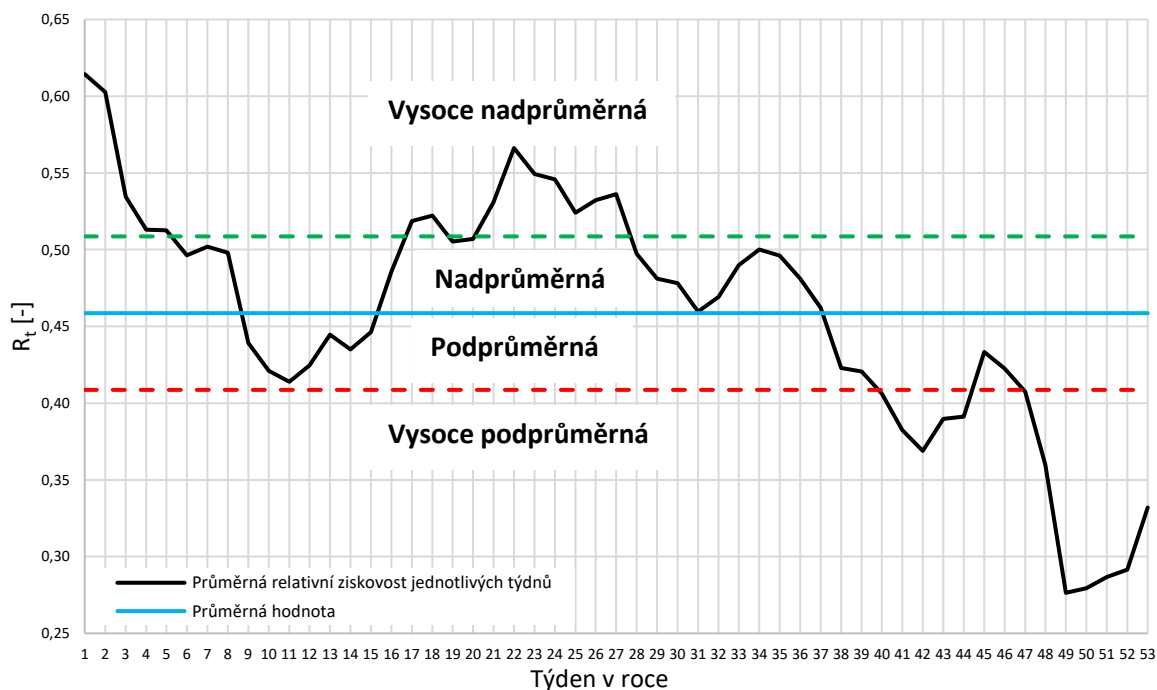
$$\overline{R} = \frac{1}{53} \sum_{i=1}^{53} R_{t,i} \quad (4.8)$$

Tato hodnota se pak navýšila/snížila o 5 %, čímž byly získány následující intervaly pro jednotlivé kategorie:

- vysoce nadprůměrná kategorie $(\overline{R} + 0,05; 1)$,
- nadprůměrná kategorie $(\overline{R}; \overline{R} + 0,05)$,
- podprůměrná kategorie $(\overline{R} - 0,05; \overline{R})$,
- vysoce podprůměrná kategorie $(0; \overline{R} - 0,05)$.

Zvolené intervaly mezi kategoriemi jsou pohyblivé a lze je dle potřeby upravovat. Subjektivní optimalizací se ukázalo, že ± 5 % je nejvhodnější varianta pro VD Mostiště a pro sledované období. Na základě hydrologické úvahy zájmové nádrže lze tyto

intervaly rozšířit, či zúžit. Posunem horní hranice (zelená čárkovaná čára na obr. č. 4) blíže k průměru získáme více ziskově zajímavých týdnů, ve kterých bude docházet k vyšším odtokům na MVE. V případě, že ji oddálíme získáme těchto týdnů méně a nebude docházet k výraznému prázdnění nádrže. Obdobně můžeme hýbat i se spodní hranicí (červená čárkovaná čára na obr. č. 4) pro získání více, či méně nezajímavých týdnů, ve kterých dochází k šetření vody v nádrži.



Obr. č. 4 - Kategorizace týdnů

Z obrázku č. 4 lze pozorovat průměrný pohyb ceny elektřiny na trhu. Je patrné, že cena dosahuje vyšších hodnot na začátku roku a okolo 22. týdne, který odpovídá přelomu měsíce května na červen. Nižší hodnoty jsou pak dosahovány v 10. týden, což je přibližně začátek března, a koncem roku.

Výsledná kategorizace týdnů pak proběhla převedením kategorií na čísla a přiřazením těchto čísel k jednotlivým týdnům:

- 4 – vysoce nadprůměrná,
- 3 – nadprůměrná,
- 2 – podprůměrná,
- 1 – vysoce podprůměrná.

Tab. 10 - Ukázka výsledné kategorizace týdnů při rozsahu intervalu $\pm 5\%$

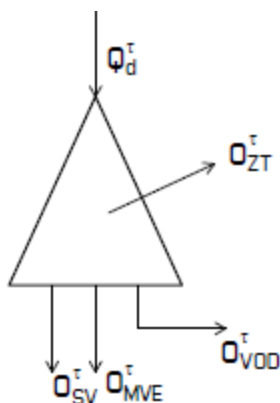
Týden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kategorie	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2

4.4 POPIS VYTVOŘENÍ SIMULAČNÍHO MODELU

V práci jsou vytvořeny celkem dva typy simulačních modelů. Oba pracují s denním krokem a jsou vytvořeny pro období jednoho roku. Modely se liší pouze v pravidlech řízení odtoku na MVE (řízení dle MŘ a navržené nové řízení). K jejich vytvoření použit program Microsoft Excel.

4.4.1 Simulační model pro řízení dle MŘ

Simulační model je sestaven na základě informací získaných z manipulačního řádu VD Mostiště z roku 2013. Tento model izolované nádrže s jedním přítokem a třemi odtoky lze zjednodušeně schematizovat takto:



Obr. č. 5 - Schematizace nádrže

Na obrázku 4 můžeme vidět:

- Q_d^τ přítok vody do nádrže v časovém kroku τ ,
- O_{VOD}^τ odběr vody na úpravnu vody v časovém kroku τ ,
- O_{MVE}^τ odtok vody z nádrže na malou vodní elektrárnu v časovém kroku τ ,
- O_{SV}^τ odtok vody z nádrže spodní výpustí (jalový odtok) v časovém kroku τ ,
- O_{ZT}^τ ztráty vody z nádrže v časovém kroku τ .

Simulační model vychází ze součtového tvaru rovnice nádrže, který vypadá takto:

$$V_N = V_0 + \sum_{i=1}^N [Q_i - O_i(V_i)] \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

Simulační model pracuje s denním časovým krokem, a proto Δt odpovídá časovému kroku jeden den. Pořadí hodnot v čase v rovnici (4.9) určuje index $i = 1, 2, \dots, N$, kde N je celkový počet řešených časových kroků (dnů). V rámci zjednodušení výpočtu nebyly uvažovány ztráty vody z nádrže, takže $O_{ZT}^\tau = 0$ (viz. kap. 4.2.2). Úpravou rovnice (4.9) lze simulační model matematicky vyjádřit rovněž takto:

$$Q_d^\tau - O_{MVE}^\tau - O_{VOD}^\tau - O_{SV}^\tau = \frac{V^\tau}{\Delta t} - \frac{V^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (4.10)$$

Pro tento vztah byly stanoveny omezující podmínky nerovnostmi:

$$\hat{O}_{MVE}^{\tau} \leq O_{MVE}^{\tau} \leq \check{O}_{MVE}^{\tau} \quad (4.11)$$

$$\hat{V}^{\tau} \leq V^{\tau} \leq \check{V}^{\tau} \quad (4.12)$$

kde značí:

\hat{O}_{MVE}^{τ} minimální odtok na MVE v časovém kroku τ ,

\check{O}_{MVE}^{τ} maximální odtok na MVE v časovém kroku τ ,

\hat{V}^{τ} minimální objem vody v nádrži v časovém kroku τ ,

\check{V}^{τ} maximální objem vody v nádrži v časovém kroku τ .

Počáteční podmínku zde představuje stav vody v nádrži v časovém kroku $\tau = 0$. Využíváme jednoletého řízení (viz. kap. 4.2.5) a proto vycházíme z plné nádrže. Stav vody v nádrži v čase $\tau = 0$ je tedy na hladině zásobního prostoru $M_z = 476,90$ m n. m., která dle batygrafie nádrže odpovídá objemu $10\,385\,274$ m³. Okrajovou podmínku zde tvoří denní průměrný přítok do nádrže Q_d^{τ} .

Velikost odtoku vody z nádrže vyháží z MŘ VD Mostiště, který stanovuje hodnoty odtoku na základě dvoustupňového dispečerského grafu. Manipulační řád říká, že veškeré odtoky z nádrže jsou přednostně odváděny přes MVE, až do výše maximální hltnosti turbíny, tj. $1,5$ m³/s. Člen \hat{O}_{MVE}^{τ} z nerovnosti (4.11) představuje omezující podmínku zdola určenou dispečerským grafem a druhý člen z nerovnosti (4.11) \check{O}_{MVE}^{τ} omezující podmínku shora určenou maximální hltností turbíny.

Z obrázku 3 je vidět, že dispečerský graf nijak neomezuje měsíční odběry vody pro úpravnu vody O_{vod} bez ohledu na stav hladiny v nádrži. V simulačním modelu se tedy uvažuje s konstantní hodnotou odběru pro úpravnu vody $0,2$ m³/s (viz. kap. 4.2.3). Dle polohy hladiny je omezen pouze minimální odtok to toku MQ , a to z hodnoty $0,4$ m³/s pro první stupeň na hodnotu $0,28$ m³/s pro druhý stupeň. Oba tyto stupně byly implementovány do simulačního modelu. Během simulace tedy dochází k ověření stavu hladiny k 1. dni v měsíci a na základě toho se pro daný měsíc určuje MQ .

V případě mimořádně suchého období, kdy by došlo k rychlému poklesu hladiny v nádrži nebo by docházelo ke zhoršování kvality vody, může vodohospodářský dispečink po vyhodnocení celkové situace v povodí nařídit omezení odtoků z nádrže:

v 1. regulačním stupni na $0,29$ m³/s a

ve 2. regulačním stupni až na $MQ = 0,12$ m³/s. [2]

Toto snížení však není v simulačním modelu zavedeno a vyháží se pouze ze základního dispečerského grafu.

Po určení velikosti odtoku dle MŘ se vypočítá změna objemu v daném časovém kroku dle rovnice (4.10) a pomocí rozšířené funkce se lineární interpolací z batygrafických čar vypočte poloha hladiny vody v nádrži.

Simulační model je sestaven tak, aby se maximální hladina v nádrži držela na hladině zásobního prostoru $M_z = 476,90$ m n. m. Veškeré přebytky vody jsou z nádrže vypouštěny přes MVE až do výše $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (max. hlnost turbíny). Při větších přítocích, které by MVE nestíhala převádět se ve výpočtu postupuje dle zavedeného zjednodušení jalového odtoku (viz. kap. 4.2.6).

Tab. 11 - Ukázka řízení odtoku z nádrže pomocí simulačního modelu

i	Rok	Měsíc	Den	Týden	H	V	Q_d	$O_{MŘ}$	O_{VOD}	O_{MVE}	O_{celk}	$Q_d - O_{celk}$	$Q_d - O_{celk}$
					[m n.m.]	[m^3]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]
Plná nádrž					476.90	10 385 274	-	-	-	-	-	-	-
1	2016	1	4	1	476.86	10 350 504	0.21	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.39	-33 696
2	2016	1	5	1	476.81	10 309 896	0.13	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.47	-40 608
3	2016	1	6	1	476.77	10 278 792	0.24	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.36	-31 104
4	2016	1	7	1	476.74	10 248 552	0.25	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.35	-30 240
5	2016	1	8	1	476.71	10 226 088	0.34	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.26	-22 464
6	2016	1	9	1	476.68	10 202 760	0.33	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.27	-23 328
7	2016	1	10	1	476.65	10 169 928	0.22	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.38	-32 832
8	2016	1	11	2	476.62	10 144 872	0.31	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.29	-25 056
9	2016	1	12	2	476.59	10 122 408	0.34	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.26	-22 464
10	2016	1	13	2	476.56	10 096 488	0.3	0.40	0.20	0.40	0.60	-0.30	-25 920

Jednotlivé sloupce v tabulce 11 značí:

- i pořadí časového kroku v simulovaném období,
- Rok, měsíc a den vyjadřují aktuální datum pro každý časový krok τ ,
- Týden pořadí kalendářního týdne ve sledovaném období (roce),
- H hladinu v nádrži v aktuálním časovém kroku τ ,
- V objem vody v nádrži odpovídající H pro každý časový krok τ ,
- Q_d denní přítok do nádrže v časovém kroku τ ,
- $O_{MŘ}$ minimální hodnotu odtoku stanovenou manipulačním řádem,
- O_{VOD} vodárenský odběr na úpravnu vody v časovém kroku τ ,
- O_{MVE} odtok z nádrže, který je vypouštěn přes MVE v časovém kroku τ ,
- O_{celk} celkový odtok z nádrže v časovém kroku τ
- $Q_d - O_{celk}$ rozdíl mezi přítokem a odtokem v časovém kroku τ .

V další části simulačního modelu probíhá výpočet výkonu a vyrobené elektrické energie s následným výpočtem teoretického denního zisku TZ_d . Výpočet výkonu probíhá dle rovnice (3.1) a rovněž jako odtok z nádrže je počítán pro každý časový krok $\Delta t = 1$ den. Zavedením zjednodušení je ve výpočtu výkonu použit hrubý spád (viz. kap. 4.2.7). Takto vypočtený výkon je následně pomocí rovnice (3.2) přepočítán na vyrobenou energii za den E_d . Dle rovnice (4.1) pak získáme teoretický denní zisk TZ_d .

Tab. 12 - Ukázka výpočtu P , E_d a TZ_d

i	Rok	Měsíc	Den	Týden	H	O_{MVE}	H_d	H_b	P	E_d	C_d	TZ_d
					[m n.m.]	[m ³ /s]	[m n.m.]	[m]	[kW]	[MWh]	[Kč/MWh]	[Kč]
Plná nádrž					476.90	-	-	-	-	-	-	-
1	2016	1	4	1	476.86	0.4	445.68	31.18	102.3	2.45	714.7	1 754.4
2	2016	1	5	1	476.81	0.4	445.68	31.13	102.1	2.45	701.2	1 718.5
3	2016	1	6	1	476.77	0.4	445.68	31.09	102.0	2.45	700.8	1 715.3
4	2016	1	7	1	476.74	0.4	445.68	31.06	101.9	2.45	694.7	1 698.7
5	2016	1	8	1	476.71	0.4	445.68	31.03	101.8	2.44	690.4	1 686.6
6	2016	1	9	1	476.68	0.4	445.68	31.00	101.7	2.44	690.4	1 684.9
7	2016	1	10	1	476.65	0.4	445.68	30.97	101.6	2.44	690.4	1 683.3
8	2016	1	11	2	476.62	0.4	445.68	30.94	101.5	2.44	679.6	1 655.4
9	2016	1	12	2	476.59	0.4	445.68	30.91	101.4	2.43	670.9	1 632.7
10	2016	1	13	2	476.56	0.4	445.68	30.88	101.3	2.43	670.1	1 629.1

V tabulce 12 jednotlivé vzorce představují:

H_d dolní hladinu vody (za turbínou) pro výpočet hrubého spádu,

P výkon dle rovnice (3.1),

E_d vyrobenou energii za den dle rovnice (3.2),

C_d denní cenu za jednotku vyrobené elektrické energie,

TZ_d teoretický denní zisk z vyrobené energie dle rovnice (4.1).

4.4.2 Simulační model s využitím navrženého pravidla řízení

Tento simulační model je sestaven v základu stejně jako předchozí. Pracuje s denním krokem pro jednoleté období a rovněž obsahuje část pro simulaci pohybu hladiny v nádrži a část výpočtovou týkající se výpočtu výkonu, energie a teoretického zisku. Liší se však v hodnotě doporučených minimálních odtoků z nádrže (neuvažujeme dvoustupňový dispečerský graf). Tyto hodnoty jsou získávány výpočtem pro každý kalendářní týden zvlášť. Výpočet odtoku je prováděn následujícím postupem.

Pravidlo řízení

Pravidlo řízení určující týdenní odtoky na MVE je převzato z [3], kde se ukázalo jako nejziskovější forma řízení odtoku z navrhovaných čtyř variant. Toto pravidlo spočívá v určení výchozí hladiny v nádrži H a k ní limitní hladiny H_{lim} , která je nižší. Výchozí hladinou pro každý kalendářní týden je koncová hladina z týdne předchozího. Limitní hladina se pak volí v rozsahu zásobního prostoru pomocí následující rovnice:

$$H_{lim,i} = M_s + k_i(M_z - M_s), \quad (4.13)$$

kde i značí číslo kategorie, M_s kótu hladiny stálého nadržení a M_z kótu hladiny zásobního prostoru. Koeficient k_i nabývá hodnot $(0;1)$ a určuje polohu limitní hladiny $H_{lim,i}$ v zásobním prostoru. Poloha $H_{lim,i}$ závisí na kategorii, do které je daný kalendářní týden zařazen. Vyšší kategorie, která prezentuje ziskově zajímavější týdny má H_{lim} volenou níže, aby zajistila vyšší odtoky a tím i vyšší zisk i při nižší poloze výchozí hladiny H . Naopak pro kategorie prezentující méně zajímavé týdny je H_{lim} volena blíže k hladině M_z , aby nedocházelo ke zbytečně velkým odtokům v týdnech, kdy se očekává nižší zisk z hlediska poklesu ceny na trhu.

Z batygrafie nádrže je pak určen objem vody v nádrži V pro výchozí hladinu H a $V_{lim,i}$ pro hladinu limitní $H_{lim,i}$. Rozdílem mezi těmito objemy je pak zvolený dostupný objem vody V_D , který můžeme vypustit během daného kalendářního týdne.

$$V_{D,i} = V - V_{lim,i} \quad (4.14)$$

V rámci zjednodušení výpočtu a manipulace na vodním díle se pracuje s týdenní změnou odtoku, tzn. že hodnota odtoku je konstantní pro celý kalendářní týden. Velikost tohoto odtoku je pak dopočítána z V_D pomocí rovnice:

$$O_{MVE,i} = \frac{V_{D,i}}{\Delta t \cdot 7} \quad (4.15)$$

Číslo 7 vyjadřuje počet dní v kalendářním týdnu a Δt vyjadřuje délku časového kroku (v našem případě 1 den). Stále se však jedná o simulaci provozu na VD Mostiště, a proto také O_{dop} podléhá omezujícím podmínkám (4.11) stanovených MŘ VD Mostiště.

Navržené pravidlo řízení určuje pouze výpočet doporučeného odtoku pro zajištění vyššího zisku. Nejedná se však o návrh kompletně nových hodnot pro dispečerský graf. Proto jsou omezujícími podmínkami hltnost turbíny a hodnota minimální odtoku do toku z 2. regulačního stupně dispečerského grafu. Velikost $O_{MVE,i}$ se tedy může pohybovat v rozsahu $\langle \hat{O}_{MVE}^T; \check{O}_{MVE}^T \rangle$, což pro VD Mostiště odpovídá hodnotám $\langle 0,29; 1,5 \rangle$ m³/s. Tímto se také stanovuje podmínka výpočtu $V_{D,i}$. Pokud by byl záporný, či tak malý, že výsledný $O_{MVE,i}$ by byl záporný či menší než stanovené \hat{O}_{MVE}^T , automaticky se do výpočtu dosadí \hat{O}_{MVE}^T .

V následující tabulce a v komentáři pod tabulkou je znázorněn postup stanovení $O_{MVE,1}$ (první týden) a $O_{MVE,2}$ (druhý týden).

Tab. 13 - Ukázka výpočtu odtoku dle navrženého pravidla řízení

i	Rok	Měsíc	Den	Týden	Kategorie	H	V	Q _d	Kategorie				O _{VOD}	O _{MVE,i}	O _{celk}
						[m n.m.]	[m ³]	[m ³ /s]	1	2	3	4			
Plná nádrž						476.90	10 384 200	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2008	12	29	1	4	476.81	10 309 896	0.84	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
2	2008	12	30	1	4	476.75	10 261 512	1.14	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
3	2008	12	31	1	4	476.67	10 188 072	0.85	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
4	2009	1	1	1	4	476.56	10 098 216	0.66	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
5	2009	1	2	1	4	476.46	10 012 680	0.71	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
6	2009	1	3	1	4	476.36	9 928 872	0.73	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
7	2009	1	4	1	4	476.24	9 832 968	0.59	1.26	1.50	1.50	1.50	0.2	1.50	1.70
8	2009	1	5	2	3	476.11	9 728 424	0.49	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60
9	2009	1	6	2	3	476.02	9 654 120	0.84	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60
10	2009	1	7	2	3	475.92	9 567 720	0.70	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60
11	2009	1	8	2	3	475.82	9 489 960	0.80	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60
12	2009	1	9	2	3	475.71	9 406 152	0.73	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60
13	2009	1	10	2	3	475.62	9 331 848	0.84	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60
14	2009	1	11	2	3	475.45	9 197 928	0.15	0.35	1.30	1.40	1.50	0.2	1.40	1.60

Komentář k výpočtu:

1. Kalendářní týden

Výchozí hladina H a k ní odpovídající objem V pro 1. kalendářní týden.

Kategorie 1. kalendářního týdne určuje, že pro $O_{MVE,1}$ bereme vypočtenou hodnotu dle rovnice (4.15) ze sloupce 4 (kategorie 4).

Vypočtená doporučená hodnota odtoku je pak vypuštěna na MVE konstantně v celém kalendářním týdnu.

2. Kalendářní týden

Výchozí hladina H a k ní odpovídající objem V pro 1. kalendářní týden.

Kategorie 2. kalendářního týdne určuje, že pro $O_{MVE,2}$ bereme vypočtenou hodnotu dle rovnice (4.15) ze sloupce 3 (kategorie 3).

Vypočtená doporučená hodnota odtoku je pak vypuštěna na MVE konstantně v celém kalendářním týdnu.

4.5 REFERENČNÍ ROK

Simulační model je sestaven pro období jednoho roku. Model simuluje provoz nádrže v historickém období a stanovuje teoretický zisk z vyrobené energie a z historické časové řady udávající cenu elektrické energie. Z výsledků získaných ze simulovaného řízení by však bylo prakticky nemožné určit universální pravidla, která by bylo možné v praxi použít při řízení v budoucích letech, a to zejména proto, že každý rok je z hydrologického hlediska jiný. To znamená, že v praxi nemůžeme při řízení hydroenergetické funkce v hydrologicky suchém roce aplikovat na nádrž pravidla, která byla získána z výsledků řízení v hydrologicky vodném roce.

Navržené odtoky by dosahovali větších hodnot než přítoky do nádrže, což by mělo za následek nežádoucího prázdnění nádrže. Z tohoto důvodu byl zaveden tzv. referenční rok.

4.5.1 Způsob vytvoření referenčního roku

Referenční rok představuje simulaci provozu nádrže v určitých hydrologických podmínkách s využitím navrženého pravidla řízení s cílem vyššího zisku z vyrobené energie. Tyto podmínky určuje kalendářní roční průtok Q_r .

V rámci práce je vytvořeno 6 referenčních roků, které byly subjektivně vybrány z historické řady průtoků dle jejich patřičných kalendářních průtoků Q_r . Celkový počet referenčních let však není ničím omezen a lze rozšířit dle potřeby. Je však důležité, aby pro tento rok existovala i časová řada průběhu ceny elektrické energie na trhu. Bez těchto údajů by bylo nemožné určit CTZ.

Referenční roky jsou subjektivně vybrány z historické řady kalendářních ročních průtoků Q_r . Jsou vybrány tak, aby jejich patřičné Q_r dostatečně pokryly rozsah hodnot za celé období. Sestupným, či vzestupným seřazením jednotlivých let dle Q_r a vnesením dlouhodobého průměrného průtoků Q_a získáme přehled historických Q_r , kde krajní hodnoty představují hranice zmíněného rozsahu hodnot. V přehledu lze taky pozorovat četnost přibližně stejných Q_r . Na základě těchto poznatků se pak vybírají takové roky, které dostatečně pokryjí tento rozsah.

Pro názornost jsou v tabulce 14 vyneseny kalendářní roční průtoky pro jednotlivé roky z historické průtokové řady použité v této práci. Lze pozorovat rozsah hodnot Q_r od 0,541 m³/s do 2,730 m³/s. V přehledu je také vidět, že získané Q_r jsou v několika případech téměř shodné a daly by se seskupit do skupin dle jejich velikosti (v tabulce znázorněno modrým podbarvením). Podmínkou pro referenční rok je existence časové řady vývoje ceny elektřiny na trhu pro tento rok. Pokud tedy vynecháme roky, u kterých cena elektřiny na trhu není známá, získáme hodnoty v tabulce 15.

Tab. 14 - Přehled a seskupení kalendářních Q_r

Rok	Q_r [m ³ /s]	Rok	Q_r [m ³ /s]
1991	0,541	Q_a	1,360
2016	0,640	2005	1,465
1989	0,659	1986	1,496
1990	0,659	1999	1,505
2003	0,902	2014	1,532
1993	0,904	1996	1,533
2015	1,005	2002	1,555
1994	1,029	2006	1,583
2008	1,036	2000	1,610
2012	1,045	1988	1,660
1998	1,064	1997	1,665
2007	1,124	1995	1,671
2011	1,161	1985	1,766
2004	1,179	2013	1,785
1992	1,199	2009	1,812
2001	1,299	1987	2,699
Q_a	1,360	2010	2,730

Tab. 15 - Roky, pro které existuje časová řada ceny elektřiny

Rok	Q_r [m ³ /s]
2016	0,640
2015	1,005
2008	1,036
2012	1,045
2011	1,161
Q_a	1,360
2014	1,532
2013	1,785
2009	1,812
2010	2,730

Z tabulky 15 je patrné, že v rámci 9 let (2008 až 2016) se pokryl téměř celý historický rozsah hodnot Q_r . Lze tedy předpokládat, že pokud vybereme jeden referenční rok z každé vyznačené skupiny, bude tento rozsah dostatečně pokryt.

V práci bylo vybráno celkem 5 referenčních roků reprezentující jejich vodnost jako:

2010 – vodný rok ($Q_r = 2,730 \text{ m}^3/\text{s}$),

2009 – vodný rok ($Q_r = 1,812 \text{ m}^3/\text{s}$),

2014 – průměrný rok ($Q_r = 1,532 \text{ m}^3/\text{s}$),

2011 – málo vodný rok ($Q_r = 1,161 \text{ m}^3/\text{s}$),

2015 – suchý rok ($Q_r = 1,005 \text{ m}^3/\text{s}$),

2016 – suchý rok ($Q_r = 0,640 \text{ m}^3/\text{s}$).

Pro každý referenční rok je vytvořen simulační model, který simuluje provoz nádrže s využitím pravidel řízení z aktuálního manipulačního řádu vodního díla. Dále je pro každý referenční rok vytvořen i simulační model s využitím navrženého pravidla řízení. Simulace vychází z plné nádrže a jedná se o roční řízení. Doporučené hodnoty odtoků na MVE jsou získávány dle postupu uvedeném v kap 4.4.2.

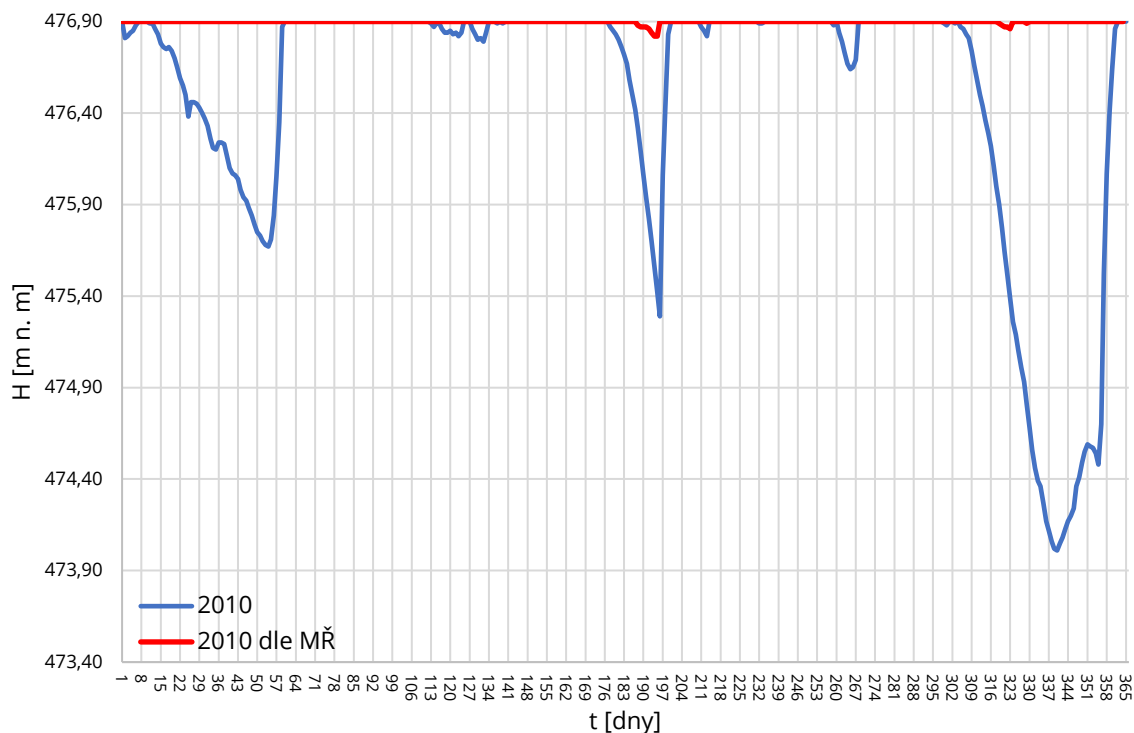
Každý referenční rok se však liší ve zvolené $H_{lim,i}$. U méně vodných roků jsou limitní hladiny voleny výše a u více vodných roků níže. To zajistí, že nakládáme s vodou v patřičném množství s ohledem na hydrologické podmínky v daných rocích.

V simulačním modelu, který pracuje s navrženým pravidlem řízení pak probíhá subjektivní optimalizace limitních hladin pro jednotlivé kategorie kalendářních týdnů. Cílem optimalizace je dosáhnout co nejvyššího zisku a dodržet přitom stanovené podmínky. Hlavní podmínkou je naplnění nádrže na konci roku z důvodu jednoletého řízení nádrže.

V rámci práce byly vyzkoušeny dvě numerické optimalizační metody pomocí Excelovské vývojářské funkce *Řešitel*. Byla použita gradientní metoda a evoluční algoritmus. Navzdory nespočtu pokusům a dlouho trvajícím výpočtům této funkce, nebyla schopna dosáhnout maximálního zisku a dodržet při tom všechny stanovené podmínky. Proto je v práci využito subjektivní optimalizace.

4.6 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Každý referenční rok má přiřazený vlastní graf vykreslující průběh hladiny během simulace při optimalizování $H_{lim,i}$ v porovnání s průběhem hladiny při simulaci řízení dle manipulačního řádu.



Obr. č. 6 - Grafické znázornění průběhu hladiny během simulace v ref. roku 2010

Z obrázku 6 je patrné, že při řízení pomocí navrženého pravidla dochází k vyššímu poklesu hladiny než při řízení dle MŘ. Největší pokles je o necelé 3 m v průběhu asi 5 týdnů a nádrž se zvládne ke konci roku znovu naplnit. Tyto výraznější poklesy hladiny však zajistily poměrně vysoký ΔTZ (viz. tabulka 16).

Sledované výsledné hodnoty simulace jsou tabelárně znázorněny. Jedná se o hodnoty minimální dosažené hladiny během simulace H_{min} , koncové hladiny H_{konec} , $CTZ_{návrh}$ a ΔTZ .

Tab. 16 - Ukázka výsledných sledovaných hodnot referenčního roku

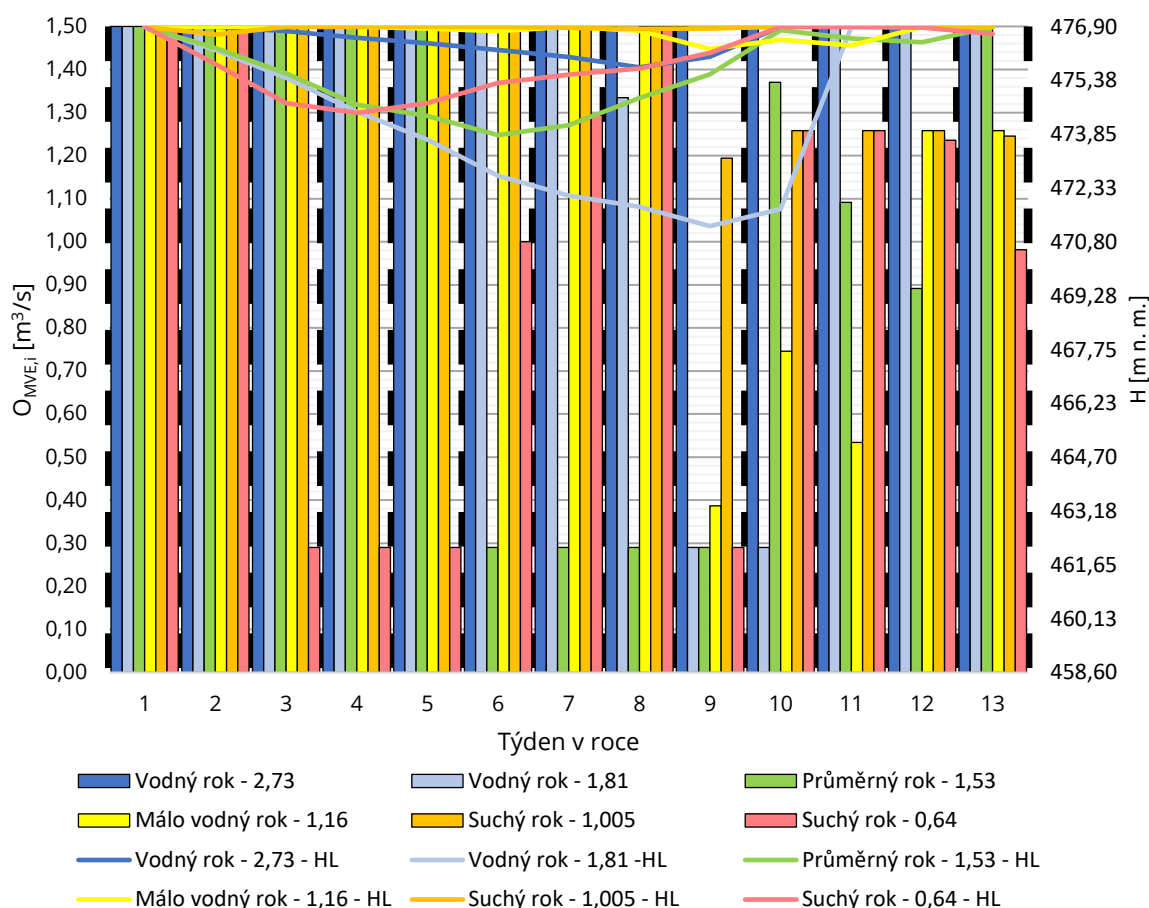
Rok	$CTZ_{návrh}$ [Kč]	H_{min} [m n. m.]	H_{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2010	3 930 060	474,01	476,90	368 885

Výsledné navržené doporučené odtoky jsou pak zapsány tabelárně včetně hladiny dosažené na konci týdne a k ní odpovídající objem vody v nádrži.

Tab. 17 - Ukázka tabelární interpretace navržených odtoků

Týden	$O_{MVE,i}$ [m ³ /s]	H [m n. m.]	Objem [m ³]
1	1,50	476,90	10 384 200
2	1,50	476,78	10 284 840
3	1,50	476,59	10 120 680
4	1,50	476,43	9 992 808
5	1,50	476,24	9 835 560

Po subjektivní optimalizaci s dostatečně vyhovujícím kritériem maximalizace ΔTZ ve všech referenčních rocích jsou navržené doporučené odtoky $O_{MVE,i}$ vyneseny do sloupcového grafu včetně jednotlivých průběhů hladin, které jsou v grafu vyneseny pomocí čar. Výsledek je zobrazen na obrázku 7 a hodnoty uvedené v legendě představují příslušný kalendářní roční průtok Q_r (celkový výsledek viz. příloha č. 1-5).



Obr. č. 7 - Ukázka výsledných navržených odtoků a průběhů hladin pro ref. roky

5 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

V práci byla využita vodní nádrž Mostiště pro vytvoření zadaného algoritmu a jeho ověření. Výše popsaným postupem bylo vytvořeno celkem 6 referenčních roků na základě vstupních dat týkajících se denních přítoků do nádrže Mostiště. Konkrétně se jedná o roky 2009, 2010, 2011, 2014, 2015 a 2016 (hodnoty Q_r viz. tab. 15).

Pro každý z těchto roků byly samostatně optimalizovány hodnoty koeficientu k_i , který upravuje polohu limitní hladiny $H_{lim,i}$ s cílem maximalizace zisku. Získané výsledné hodnoty pro jednotlivé referenční roky jsou shrnuty v kapitole 5.1.

5.1 REFERENČNÍ ROKY

5.1.1 2010 – vodný rok ($Q_r = 2,730 \text{ m}^3/\text{s}$)

Z tabulky 14 vyplývá, že rok 2010 je z historické řady nejvodnějším rokem. Jeho kalendářní roční průtok Q_r činí $2,73 \text{ m}^3/\text{s}$, což je dvojnásobek dlouhodobého průměrného průtoku $Q_a = 1,36 \text{ m}^3/\text{s}$. Z tohoto důvodu byly limitní hladiny $H_{lim,i}$ pro jednotlivé kategorie voleny velmi nízko. Subjektivní optimalizací vyplynulo, že snížení koeficientu k_i a tím i $H_{lim,i}$ pod hodnoty uvedené v tabulce 18 nemá na výsledné sledované hodnoty vliv, protože se jedná o velice vodný rok. Dostupné objemy V_D by pak byly tak velké, že při omezující podmínce hltnosti turbíny $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bychom nebyli schopni tyto objemy vypustit.

Tab. 18 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2010

k_i	Limitní hodnoty $H_{lim,i}$ a $V_{lim,i}$		
0,650	$H_{lim,4} =$	470,50	m n. m.
	$V_{lim,4} =$	5 797 766	m n. m.
0,700	$H_{lim,3} =$	471,41	m n. m.
	$V_{lim,3} =$	6 359 990	m n. m.
0,750	$H_{lim,2} =$	472,33	m n. m.
	$V_{lim,2} =$	6 947 872	m n. m.
0,800	$H_{lim,1} =$	473,24	m n. m.
	$V_{lim,1} =$	7 565 712	m n. m.

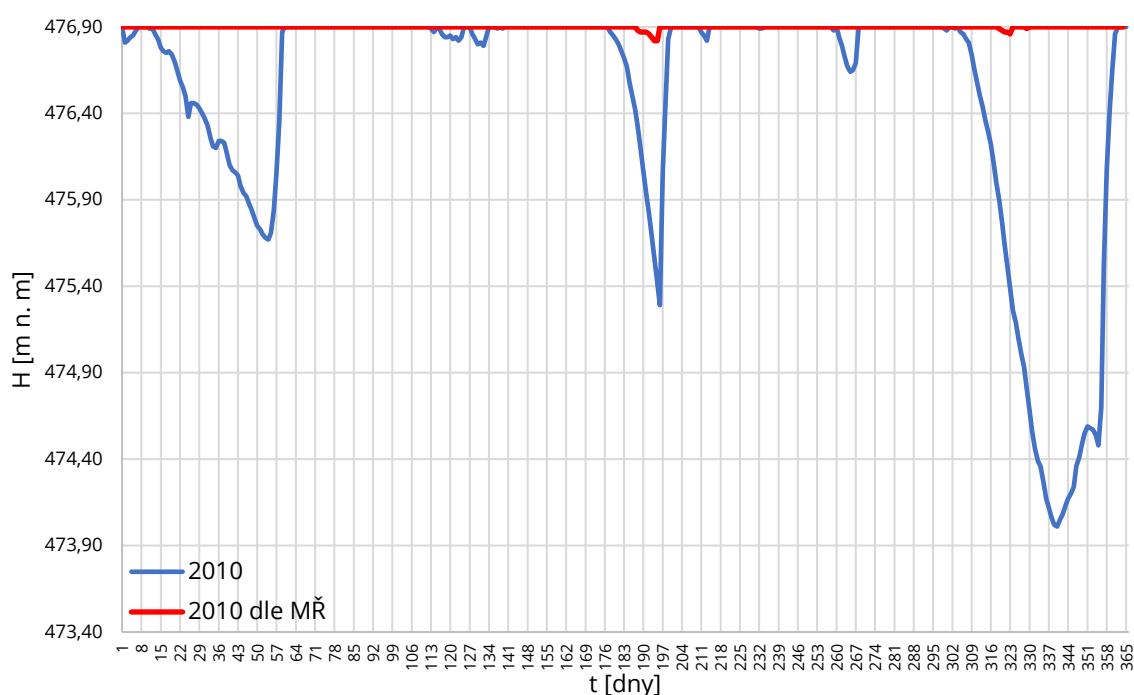
Použitím těchto optimalizovaných limitních hladin a objemů se při simulaci provozu s využitím navrženého pravidla dosáhlo těchto výsledných hodnot:

Tab. 19 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2010

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H_{min} [m n. m.]	H_{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2010	3 930 060	474,01	476,90	368 885

Z tabulky 19 vyplývá, že při simulaci provozu s využitím navrženého pravidla a optimalizovaných limitních hodnot z tabulky 18 bylo dosaženo v referenčním roce 2010 teoretického zisku $\Delta TZ = 368\,885$ Kč. Jedná se o teoretický zisk za kalendářní rok 2010, který byl však velice vodný.

Během optimalizace koeficientu k_i se kontrolovala minimální dosažená a koncová hladina v simulovaném období. Minimální dosažená hladina dosáhla v průběhu simulace hodnoty 474,01 m n. m. To činí absolutní pokles hladiny 2,89 m. Z obrázku 8 je patrné, že tohoto poklesu bylo dosaženo v průběhu několika týdnů a byla při tom dodržena podmínka maximálního dovoleného poklesu z MŘ. Tato podmínka je stanovena na doporučených hodnotách 20–30 (50) cm/den s maximem 1,2 m/den. Avšak nesmí být překročena hodnota poklesu hladiny 3,5 m/týden.



Obr. č. 8 - Průběh hladiny během simulace v ref. roce 2010

5.1.2 2009 – vodný rok ($Q_r = 1,812$ m³/s)

Rok 2009 je z hydrologického hlediska třetí nejvodnější rok z dostupné historické řady. Kalendářní roční průtok v tomto roce je však o necelý 1 m³/s nižší než v předchozím referenčním roce 2010. Nicméně hodnotou $Q_r = 1,812$ m³/s se pořád řadí mezi vodné referenční roky. S uvážením této skutečnosti byly hodnoty k_i voleny opět nižší, abychom docílili větších dostupných objemů $V_{D,i}$. Z důvodu menší vodnosti roku než v případě roku 2010 docházelo během simulace k větším poklesům hladiny. To umožnilo volit k_i nižší a v případě kategorie 4 až na hodnotu $k_4 = 0,50$. Optimalizací jsme získali následující limitní hodnoty.

Tab. 20 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2009

k_i	Limitní hodnoty $H_{lim,i}$ a $V_{lim,i}$		
0,500	$H_{lim,4} =$	467,75	m n. m.
	$V_{lim,4} =$	4 286 812	m n. m.
0,650	$H_{lim,3} =$	470,50	m n. m.
	$V_{lim,3} =$	5 797 766	m n. m.
0,800	$H_{lim,2} =$	473,24	m n. m.
	$V_{lim,2} =$	7 565 712	m n. m.
0,950	$H_{lim,1} =$	475,99	m n. m.
	$V_{lim,1} =$	9 623 353	m n. m.

Z tabulky 20 pozorujeme, že i když se jedná o vodný rok stejně jako rok 2010, tak koeficienty k_1 a k_4 jsou výrazně jiné. Toto větší rozpětí hodnot k_i je způsobeno právě menší vodností a tím většimu kolísání hladiny. Pro takto stanovené k_i bylo dosaženo následujícího teoretického zisku.

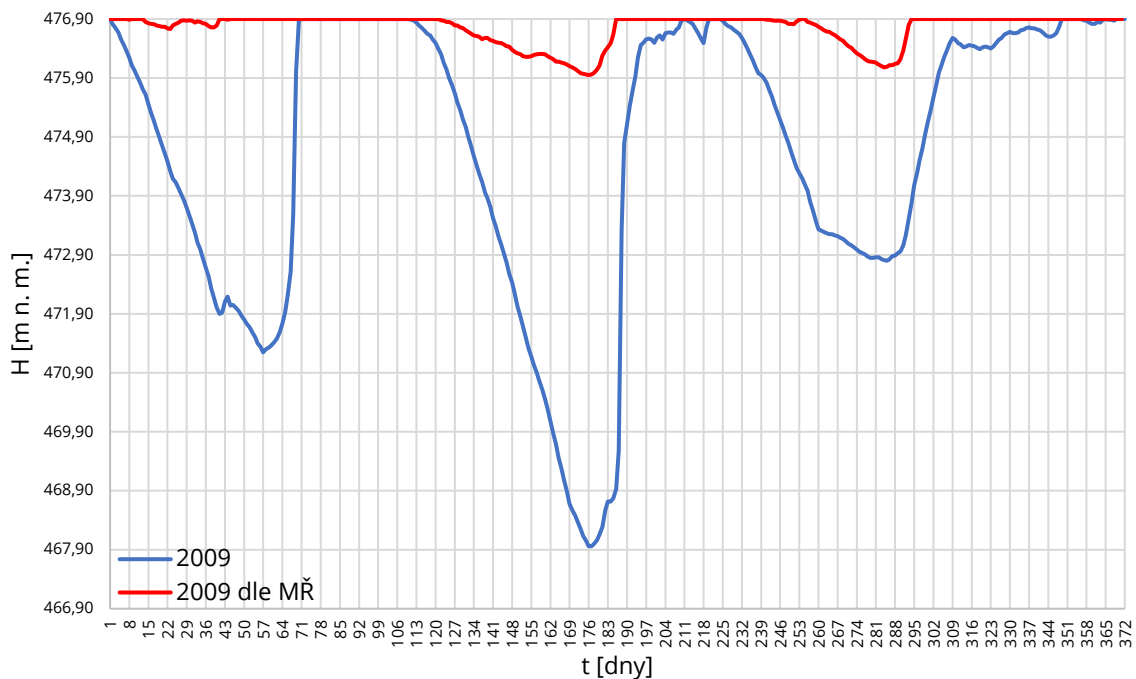
Tab. 21 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2009

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H_{min} [m n. m.]	H_{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2009	3 251 154	467,96	476,90	747 383

Z tabulky 21 vidíme, že celkový teoretický zisk je o cca 700 tis. Kč nižší, avšak ΔTZ je více než dvojnásobný. Na velikost ΔTZ má výrazný vliv velikost přítoků v tomto roce. V roce 2010 byly přítoky tak velké, že docházelo k odtokům odpovídajícím maximální hltnosti turbíny i při řízení dle MŘ. A díky tomu docházelo k vyšším ziskům i při běžném řízení.

Během simulace také došlo k většímu poklesu hladiny v nádrži, a to až na hodnotu 467.96 m n. m. Této hladiny bylo dosaženo v letním období, kdy se nejedná jen o období nižších hodnot přítoků, ale i o období vyšší ziskovosti týdnů. Spojením těchto dvou faktorů pak dochází k výrazným poklesům hladiny v nádrži. Opět však není překročena podmínka maximálního poklesu hladiny stanovená manipulačním řádem.

Na obrázku 9 je zřetelně vidět, kdy dochází během simulace k výrazným poklesům. Jedná se konkrétně o období očekávaných malých přítoků do nádrže, jako třeba zimní období v lednu a únoru, a období ziskově zajímavějších týdnů v kategorii 4. Lze také pozorovat vyšší poklesy hladiny i při simulaci řízení odtoků dle manipulačního řádu než v roce 2010.



Obr. č. 9 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2009

5.1.3 2014 – průměrný rok ($Q_r = 1,532 \text{ m}^3/\text{s}$)

Referenční rok 2014 je zvolen jako průměrný, protože kalendářní roční průtok $Q_r = 1,532 \text{ m}^3/\text{s}$ se nejvíce blíží dlouhodobému průměru $Q_a = 1,36 \text{ m}^3/\text{s}$. Ačkoliv se v průměru jedná o vodnější rok, než je dlouhodobý průměr, docházelo k vyšším poklesům hladiny už i při řízení dle stávajících pravidel. U výše popsanych vodných roků pokles hladiny při řízení dle dispečerského grafu nepřesáhl hodnotu 1 m. V tomto referenčním roce však došlo k poklesu hladiny téměř 2 m. Lze tedy očekávat, že pokles hladiny při využití navrženého pravidla bude vyšší než u předchozích referenčních roků. Na základě tohoto předpokladu se volily koeficienty k_i na vyšších hodnotách. Pro maximalizaci zisku z tohoto referenčního roku byly stanoveny následující koeficienty k_i .

Tab. 22 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2014

k_i	Limitní hodnoty $H_{lim,i}$ a $V_{lim,i}$		
0.590	$H_{lim,4} =$	469,40	m n. m.
	$V_{lim,4} =$	5 162 555	m n. m.
0.940	$H_{lim,3} =$	475,80	m n. m.
	$V_{lim,3} =$	9 477 037	m n. m.
0.944	$H_{lim,2} =$	475,88	m n. m.
	$V_{lim,2} =$	9 535 563	m n. m.
0.946	$H_{lim,1} =$	475,91	m n. m.
	$V_{lim,1} =$	9 564 827	m n. m.

Hodnoty optimalizovaných koeficientů k_i mají výrazně odlišný charakter než v předchozích referenčních rocích. První 3 kategorie mají téměř shodné a vysoké k_i . Kategorie 4, tedy kategorie ziskové zajímavějších týdnů má na druhou stranu koeficient k_i poměrně nízký. Z toho plyne, že je v tomto roce kladen velký důraz na pošetření vody v období týdnů v méně ziskových kategoriích a následné využití potenciálu vyššího spádu v týdnech zatříděných v kategorii 4. Simulací provozu za stanovených podmínek byly získány tyto výsledné hodnoty:

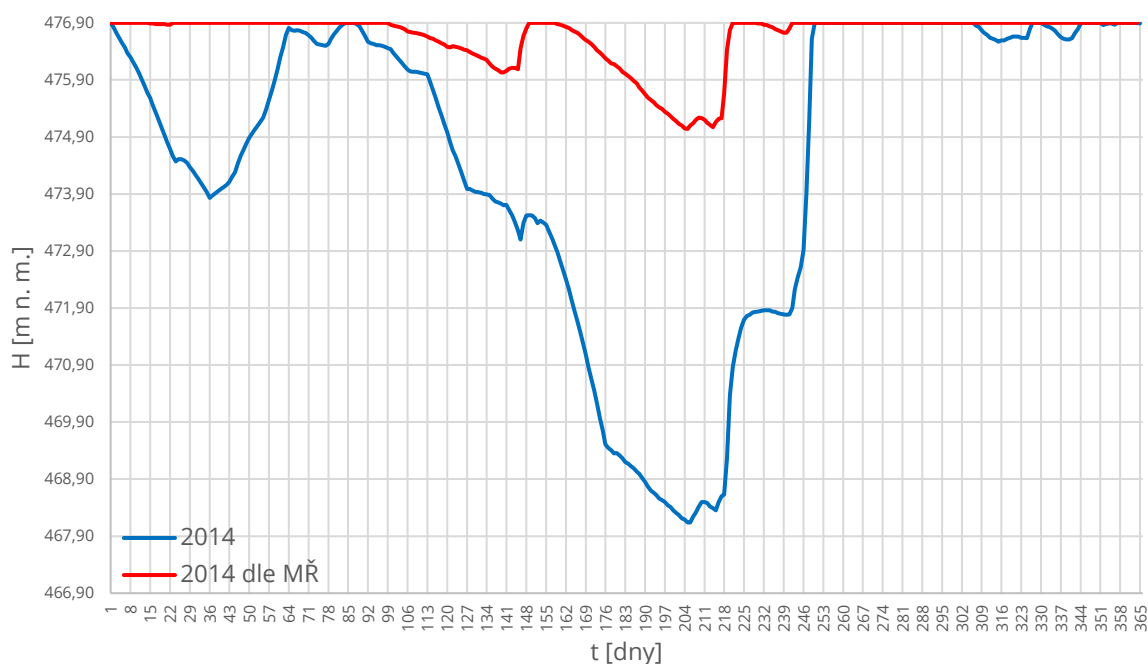
Tab. 23 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2014

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H _{min} [m n. m.]	H _{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2014	2 012 079	468,14	476,90	139 326

Celkový teoretický zisk pro referenční rok 2014 se pohybuje lehce nad 2 mil. Kč. Jedná se výrazný pokles z pohledu předchozích referenčních roků, kde CTZ_{návrh} činil 3,9 mil. Kč pro rok 2010 a 3,2 mil. Kč pro rok 2009. Tento markantní rozdíl je způsoben především nižší cenou elektřiny na trhu v tomto roce. V letech 2009 a 2010 se pohybovala v průběhu roku mezi hodnotami 1 073 Kč – 1 550 Kč/MWh, zatímco v roce 2014 byla cena v rozmezí 900–985 Kč. V rámci maximálních hodnot se tak jedná o pokles cca 500 Kč/MWh.

Navzdory nižším cenám a CTZ_{návrh} bylo optimalizací koeficientů k_i dosaženo ΔTZ necelých 140 tis. Kč. V porovnání s předchozím referenčním rokem, kdy bylo dosaženo ΔTZ cca 750 tis. Kč se jedná o velký pokles. Tato hodnota již není tolik ovlivněna nižší cenou elektřiny na trhu, nýbrž nižšími přítoky do nádrže. Na obrázku 10 je znázorněn průběh hladiny v nádrži během simulace. V předchozích referenčních rocích docházelo k rychlejšímu plnění nádrže a díky tomu se navržené pravidlo v ziskovějších týdnech mohlo projevit dříve a na delším období, než je tomu zde. Zde lze pozorovat pozvolné plnění nádrže napříč několika týdny, což má za následek pozdější dosažení $H_{lim,i}$.

Během simulace bylo dosaženo minimální hladiny v nádrži 468,14 m n. m. Navzdory tomu, že se jedná o méně vodný rok než rok 2009, tak se minimální dosažená hladina téměř neliší. To poukazuje na podobné rozložení velikostí přítoků do nádrže v letním období. Rovněž stejně jako v předchozích referenčních rocích se kontrolovala podmínka rychlosti poklesu hladiny během simulace a stejně jako v předchozích simulacích tato podmínka porušena nebyla.



Obr. č. 10 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2014

5.1.4 2011 – málo vodný rok ($Q_r = 1,161 \text{ m}^3/\text{s}$)

Referenční rok 2011 je označen jako málo vodný rok, protože jeho kalendářní roční průměr Q_r je o $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ menší než dlouhodobý průměr. Z hydrologického hlediska pak lze očekávat nižší zisky a vyšší pokles hladiny během simulace. Již při tomto Q_r ukázala simulace při řízení dle stávajících pravidel stanovených v manipulačním řádu, že se nádrž nedokáže na konci roku naplnit na kótu hladiny $M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$ Bylo dosaženo nižší hodnoty, a to $476,46 \text{ m n. m.}$ Optimalizace koeficientů k_i pak probíhala tak, aby bylo dosaženo maximálního možného zisku, avšak na konci roku nedošlo k většímu záklesu hladiny než na $476,46 \text{ m n. m.}$ se zadanou tolerancí $\pm 15 \text{ cm.}$ S touto omezující podmínkou pak byly koeficienty optimalizovány následovně:

Tab. 24 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2011

k_i	Limitní hodnoty $H_{\text{lim},i}$ a $V_{\text{lim},i}$		
0,880	$H_{\text{lim},4} =$	474,70	m n. m.
	$V_{\text{lim},4} =$	8 623 507	m n. m.
0,931	$H_{\text{lim},3} =$	475,61	m n. m.
	$V_{\text{lim},3} =$	9 345 353	m n. m.
0,947	$H_{\text{lim},2} =$	475,93	m n. m.
	$V_{\text{lim},2} =$	9 579 458	m n. m.
0,953	$H_{\text{lim},1} =$	476,04	m n. m.
	$V_{\text{lim},1} =$	9 668 168	m n. m.

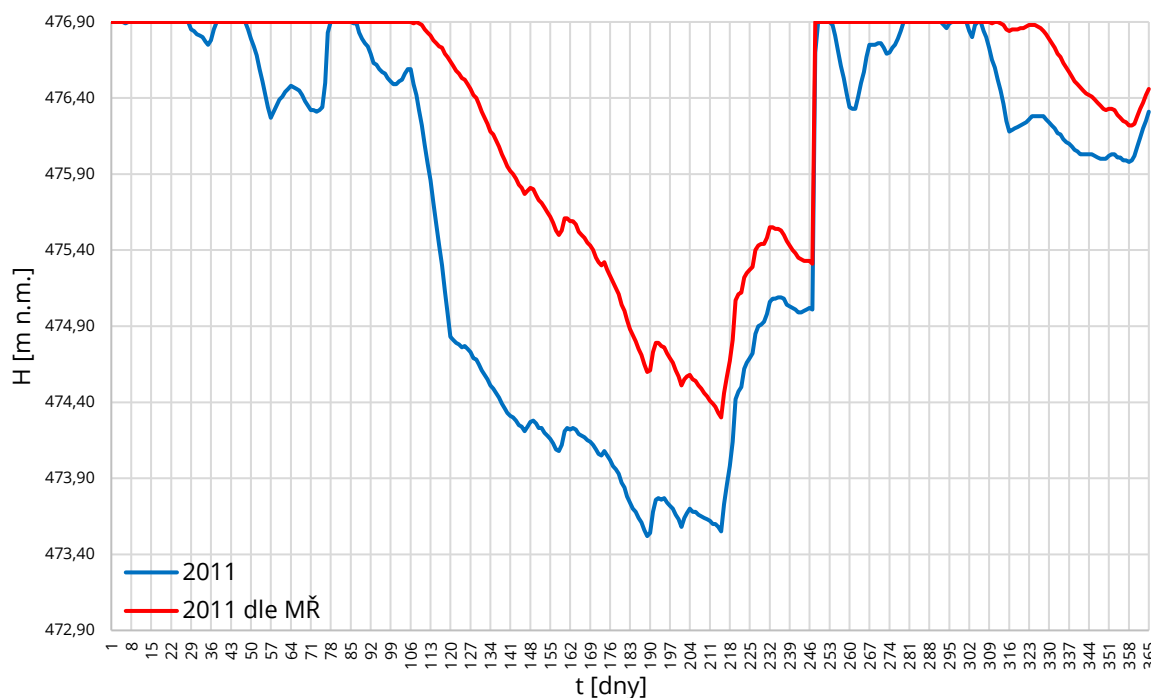
Z tabulky 24 lze pozorovat, že čím menší Q_r referenčního roku, tím vyšší a přesnější jsou jednotlivé koeficienty k_i .

Tab. 25 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2011

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H _{min} [m n. m.]	H _{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2011	2 210 618	473,52	476,31	52 817

Využitím navrženého pravidla řízení se simulací dosáhlo CTZ_{návrh} 2,2 mil. Kč. Jedná se o hodnotu vyšší než v průměrném referenčním orku 2014. Toho však je docíleno pouze obecně vyšší cenou elektřiny na trhu v roce 2011. Teoretický zisk získaný simulací provozu činí necelých 53 tis. Kč. Zde se nám potvrzuje, že vyšší CTZ_{návrh} je nejvíce ovlivněn cenou na trhu, protože teoretický zisk je cca o 60% nižší než v předchozím referenčním roce.

Nicméně nedošlo tak k velkému propadu hladiny během simulace. Minimální dosažená hladina byla na kótě 473,52 m n. m. Takto výrazně nižší pokles je zapříčiněn vysokým $k_4 = 0,880$, který ovlivňuje velikost odtoků v týdnech zatříděných v kategorii 4. Ovšem z pohledu optimalizačního kritéria – maximalizace zisku, nebylo výhodné k_4 volit nižší. Docházelo by pak k velkým úbytkům vody, které by se nezvládaly dostatečně rychle doplnit a v následujících obdobích by nám tato voda chyběla. Tím by se výrazně snížil teoretický zisk.



Obr. č. 11 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2011

Z obrázku 11 je patrná podobnost v průběhu hladiny v letním období mezi simulacemi řízení dle MŘ a dle navržených pravidel. Tato podobnost je způsobena vyššími koeficienty k_i . Nejnižší limitní hladinou je $H_{lim,4} = 474,70$ m n. m., což odpovídá začátku podobného úseku průběhu hladin. Jakmile se hladina dostala pod tuto limitní hladinu,

dostupný objem $V_{d,i}$ by dle rovnice (4.14) vyšel záporný. Pokud tato situace v simulačním modelu nastane, řízení se provádí dle manipulačního řádu. Konkrétně dle druhého regulačního stupně.

5.1.5 2015 – suchý rok ($Q_r = 1,005 \text{ m}^3/\text{s}$)

Z tabulky 14 víme, že v průměrné hodnotě kalendářního ročního průtoku Q_r se rok 2015 neřadí mezi ty nejsušší. Rok 2015 se však obecně řadí mezi suché roky s velmi horkým létem. Tato skutečnost má velmi nepříznivý vliv na velikost přítoků do nádrže a tím i na polohu hladiny v letním období.

Výsledné koeficienty k_i jsou na velmi vysokých hodnotách. Z následující tabulky můžeme pozorovat, že výsledné limitní hladiny jsou poměrně vysoko a pro kategorii 1 je $H_{lim,1} = M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$ Z toho plyne, že navržené pravidlo při kategorii 1 není v průběhu simulace aktivní. Hodnoty odtoků pro kategorii 1 jsou pak dle manipulačního řádu $0,29 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tab. 26 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2015

k_i	Limitní hodnoty $H_{lim,i}$ a $V_{lim,i}$		
0,906	$H_{lim,4} =$	475,18	m n. m.
	$V_{lim,4} =$	8 986 758	m n. m.
0,910	$H_{lim,3} =$	475,25	m n. m.
	$V_{lim,3} =$	9 043 640	m n. m.
0,920	$H_{lim,2} =$	475,44	m n. m.
	$V_{lim,2} =$	9 185 844	m n. m.
1,000	$H_{lim,1} =$	476,90	m n. m.
	$V_{lim,1} =$	10 385 274	m n. m.

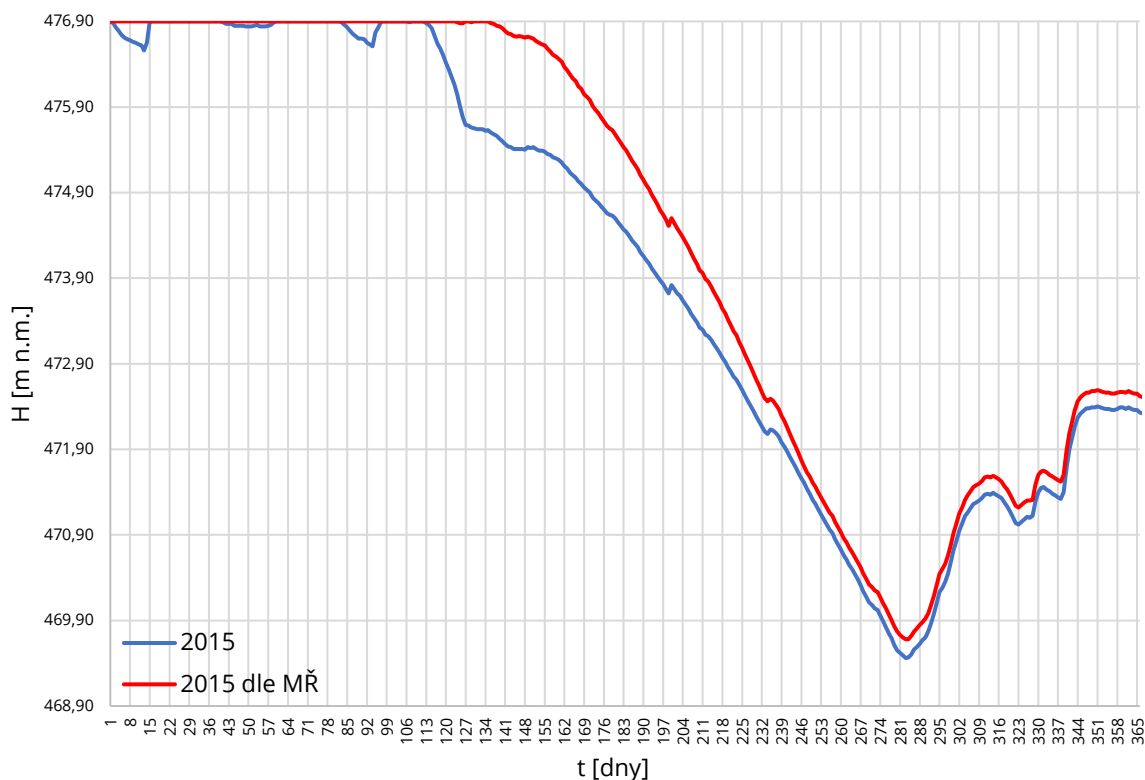
Simulací provozu s využitím limitních hodnot z tabulky 26 byly získány výsledky uvedené v následující tabulce.

Tab. 27 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2015

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H_{min} [m n. m.]	H_{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2015	1 336 564	469,46	472,17	38 754

Minimální hladina při simulaci provozu s využitím navržených pravidel řízení dosáhla hodnoty 469,46 m n. m. V porovnání s ostatními referenčními roky se nejedná o výrazně nižší hodnotu. Kóta hladiny na konci simulace má však k cílené hodnotě $M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$ poměrně daleko. Jedná se o stejný problém jako při simulaci referenčního roku 2011, kdy se nádrž nedaří naplnit v rámci jednoho roku ani při řízení dle manipulačního řádu. Optimalizace koeficientů k_i pak probíhá jednak z hlediska maximalizace zisku a s cílem koncové hladiny na stejné kótě jako při řízení dle MŘ

s tolerancí ± 15 cm. Za těchto podmínek byl průběh hladiny ze simulace s využitím navržených pravidel velmi podobný průběhu hladiny při simulaci dle pravidel stanovených manipulačním řádem. Na obrázku 12 pozorujeme výrazný pokles hladiny v letním období. Přítoky do nádrže jsou v tomto období tak malé, že i při zvolených nízkých odtocích se nádrž neplní. Při těchto souvislostech bylo dosaženo teoretického zisku pouze necelých 39 tis. Kč. Z obrázku 12 lze vypočítat, že tohoto teoretického zisku bylo dosaženo v první polovině roku, kdy byly aktivní navržená pravidla. Při následném poklesu hladiny již tato pravidla aktivní nebyla. Nejnižší limitní hladina byla zvolena pro kategorii 4 a to $H_{lim,4} = 475,18$ m n. m. Jakmile se hladina H během simulace dostala pod tuto hodnotu, navržené pravidlo řízení se stalo neaktivním a dále probíhalo řízení dle MŘ. To vysvětluje shodný průběh hladiny v nádrži. Avšak z grafu vidíme, že i když je průběh shodný, probíhal na nižší hladině. Z toho lze dedukovat nižší hrubý spád a následně i nižší hodnoty vyrobené energie. V tomto období roku pak dochází při simulaci s využitím navržených pravidel ke ztrátě. Avšak teoretický zisk získaný v již zmiňované první polovině roku tyto ztráty pokrýl.



Obr. č. 12 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2015

5.1.6 2016 – suchý rok ($Q_r = 0,640 \text{ m}^3/\text{s}$)

Z tabulky 14 víme, že rok 2016 je druhý nejsušší rok v použité historické průtokové řadě. Jelikož se jedná o rok následující bezprostředně předchozím referenčním roku, očekávají se velice podobné výsledky. Průměrný kalendářní roční průtok pro rok 2016 je téměř o 40 % nižší než kalendářní Q_r roku 2015. Z tohoto důvodu se očekávají výrazně nižší výsledné hodnoty teoretického zisku i sledovaných hladin než u předchozího referenčního roku. Optimalizované koeficienty k_i jsou opět velmi vysoké. Pro kategorii 1 je opět stanovena $H_{lim,1} = M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$ stejně jako tomu bylo v předchozím referenčním roku. Nyní je však i pro kategorii 2 limitní hladina téměř shodná s hladinou M_z . Koeficient k_2 je optimalizován na hodnotu 0,990. Ostatní výsledné limitní hodnoty jsou následující:

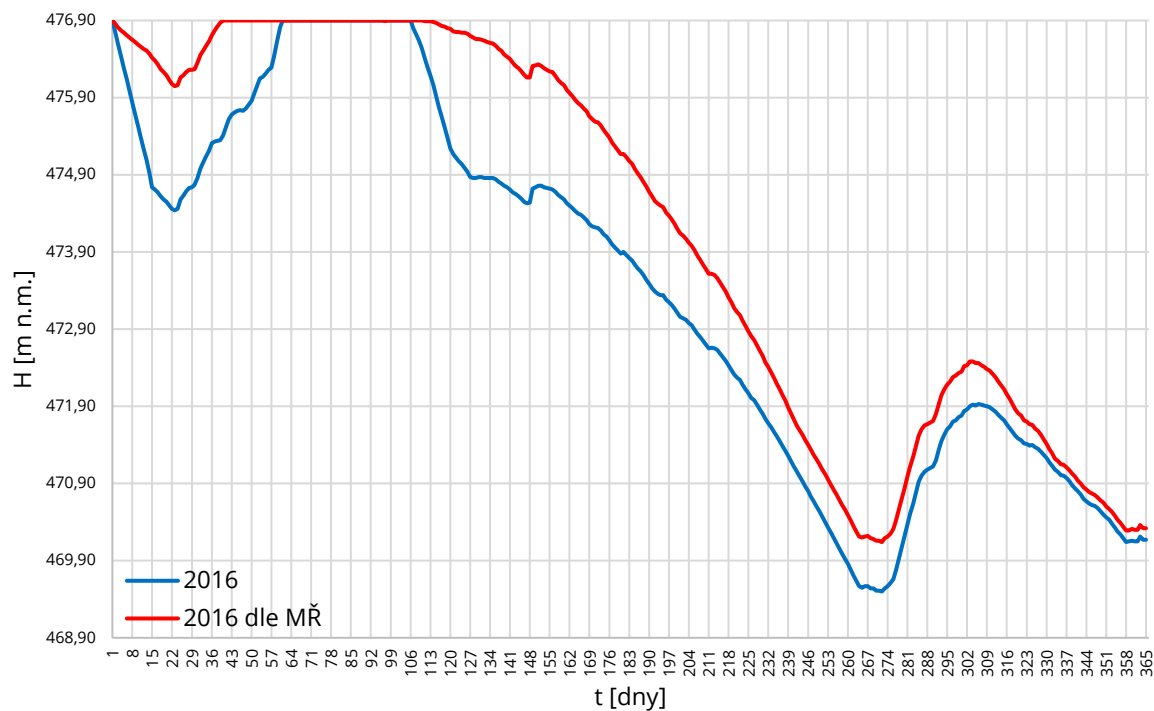
Tab. 28 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2016

k_i	Limitní hodnoty $H_{lim,i}$ a $V_{lim,i}$		
0,877	$H_{lim,4} =$	474,65	m n. m.
	$V_{lim,4} =$	8 582 047	m n. m.
0,878	$H_{lim,3} =$	474,67	m n. m.
	$V_{lim,3} =$	8 595 867	m n. m.
0,990	$H_{lim,2} =$	476,72	m n. m.
	$V_{lim,2} =$	10 230 354	m n. m.
1,000	$H_{lim,1} =$	476,90	m n. m.
	$V_{lim,1} =$	10 385 274	m n. m.

Tab. 29 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2016

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H_{min} [m n. m.]	H_{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2016	759 643	469,50	470,17	17 200

Z tabulky 29 vidíme, že celkový teoretický zisk získaný simulací s využitím navržených pravidel je téměř poloviční než u výsledku simulace referenčního roku 2015. Tento výsledek byl očekáván z pohledu o 40 % nižšího kalendářního ročního průtoku vůči hodnotě z referenčního roku 2015. K menšímu celkovému zisku taky přispěla skutečnost v průměru o 100 Kč/MWh nižší ceny elektrické energie v tomto roce než v roce 2015. Navzdory nižším přítokům do nádrže se během simulace dosáhlo téměř shodné hodnoty minimální hladiny H_{min} v letním období jako v referenčním roce 2015. O 2 m nižší koncová hladina v simulaci poukazuje na výrazně menší přítoky nádrže na konci roku 2016 než v roce 2015. Využitím navržených pravidel řízení se však i v takto nepříznivých hydrologických podmínkách dokázalo vytvořit teoretický zisk $\Delta TZ = 17 \text{ tis. Kč}$.



Obr. č. 13 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2016

Z obrázku 13 pozorujeme podobný průběh hladiny během simulace jako v referenčním roce 2015. Navržená pravidla řízení jsou aktivní a vytváří zisk v první polovině roku, kdy je v nádrži hladina H vyšší než stanovené limitní hladiny $H_{lim,i}$. Následným poklesem hladiny v druhé polovině roku se navržená pravidla stávají neaktivními a probíhá řízení dle manipulačního řádu. Vidíme taky, že s výrazným úbytkem vody z nádrže byl vytvořen teoretický zisk pouze 17 tis. Kč.

5.2 POUŽITÍ NAVRŽENÉHO ŘÍZENÍ NEZÁVISLOU TŘETÍ OSOBOU

Navržená doplňující pravidla řízení formou optimalizovaných referenčních roků byly představeny dvěma subjektům, kteří se nepodílely na jejich vytvoření. Nezainteresovanost byla důležitá z hlediska poznatku, zda jsou tyto pravidla řízení přehledná a dostačující jako podklad pro provozovatele MVE a VD, který se nesetkal s postupem jejich vytvoření.

Byl sestaven simulační model, do kterého se odtoky v jednotlivých kalendářních týdnech zadávají manuálně na základě navržených doplňující pravidel řízení. Za celé simulované období se opět sleduje minimální dosažená hladina H_{min} během simulace, hladina na konci simulovaného období H_{konec} , celkový teoretický zisk $CTZ_{návrh}$ a teoretický zisk ΔTZ . Cílem jednotlivých subjektů tedy bylo, aby s pomocí navržených doplňujících pravidel řízení provedly simulaci provozu nádrže Mostiště pro rok 2017. V rámci těchto simulací platily stejné podmínky jako pro jednotlivé referenční roky. Jedná se především o omezující hodnoty odtoku, podmínka jednoletého řízení a snažit se dosáhnout co nejvyššího zisku.

Každý subjekt měl na simulaci pouze jeden pokus a nesměl měnit již zadané předchozí hodnoty odtoků. Dále byl subjektům poskytnut pouze průběžný přístup k průtokové řadě pro rok 2017. Tímto bylo zajištěno, že subjekt nebyl schopen určit odtok na základě budoucích (již známých) přítoků do nádrže.

Subjekt 1

První nezávislou osobou je student oboru vodního hospodářství krajiny na fakultě stavební VUT v Brně. Jedná se tedy o osobu, která potřebné znalosti ohledně řízení odtoku z nádrže a provozu MVE.

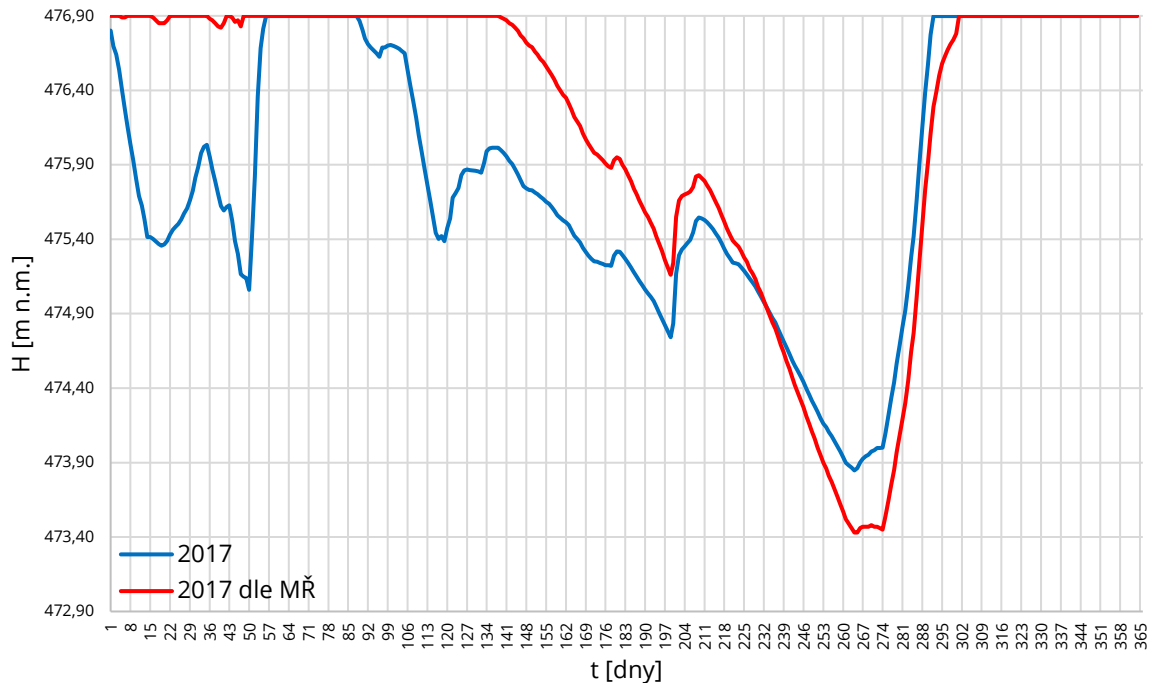
K simulaci přistupoval s úvahou, že roky 2015 a 2016 byly velmi suché, a tak lze předpokládat, že 2017 bude rovněž suchý. Proto využil doplňujícího pravidla řízení pro referenční rok 2016, který představuje suchý rok s kalendářním ročním průtokem $Q_r = 0,640 \text{ m}^3/\text{s}$.

Během simulace pak kontroloval hodnotu hladiny H v nádrži na konci každého kalendářního týdne. Pokud se hladina H pohybovala v podobných hodnotách jako během simulace pro rok 2016, dosazoval hodnoty odtoků jako v tento referenční rok. V některém období během simulace bylo však vody více, a tak se uchýlil k hodnotám odtoků získaných z vodnějších referenčních roků. Tímto postupem pak provedl simulaci provozu s následujícími výsledky.

Tab. 30 - Výsledné sledované hodnoty – subjekt 1

Rok	$CTZ_{návrh}$ [Kč]	H_{min} [m n. m.]	H_{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2017	1 281 712	473,85	476,90	70 697

Subjekt 1 svým osobním přístupem k využití navržených doplňujících pravidel dosáhl teoretického zisku ΔTZ necelých 71 tis. Kč. Podmínka jednoletého řízení, tj. naplnění nádrže v rámci jednoho roku, byla splněna. Průběh hladiny během simulace provozu je vyobrazen na následujícím obrázku.



Obr. č. 14 - Průběh hladiny během simulace – subjekt 1

Z obrázku 14 pozorujeme, že využitím navržených pravidel řízení došlo k výraznějšímu kolísání hladiny, ale nedošlo k tak velkému záklesu hladiny v letním období jako při simulaci řízení provozu dle manipulačního řádu VD Mostiště. Díky tomu, taky došlo k naplnění nádrže o cca týden dříve než při simulaci řízení dle MŘ. Vzhledem k tomu, že na konci roku je nádrž neustále plná, subjekt 1 volil $O_{MVE,i}$ v zimním období, kdy se jedná o kalendářní týdny s nízkou ziskovostí. Tím zajistil naplnění nádrže a využití pro hydroenergetiku veškeré přebytky odtoků. Pokud by se subjekt rozhodl na konci roku zvýšit hodnoty $O_{MVE,i}$ dosáhl by vyššího teoretického zisku, ale na druhou stranu by riskoval porušení jednoletého řízení. Přítoky do nádrže během zimního období subjekt dopředu neznal. Proto se rozhodnul neriskovat a radši pro hydroenergetiku v období nižších cen využít pouze přebytky vody.

Subjekt 2

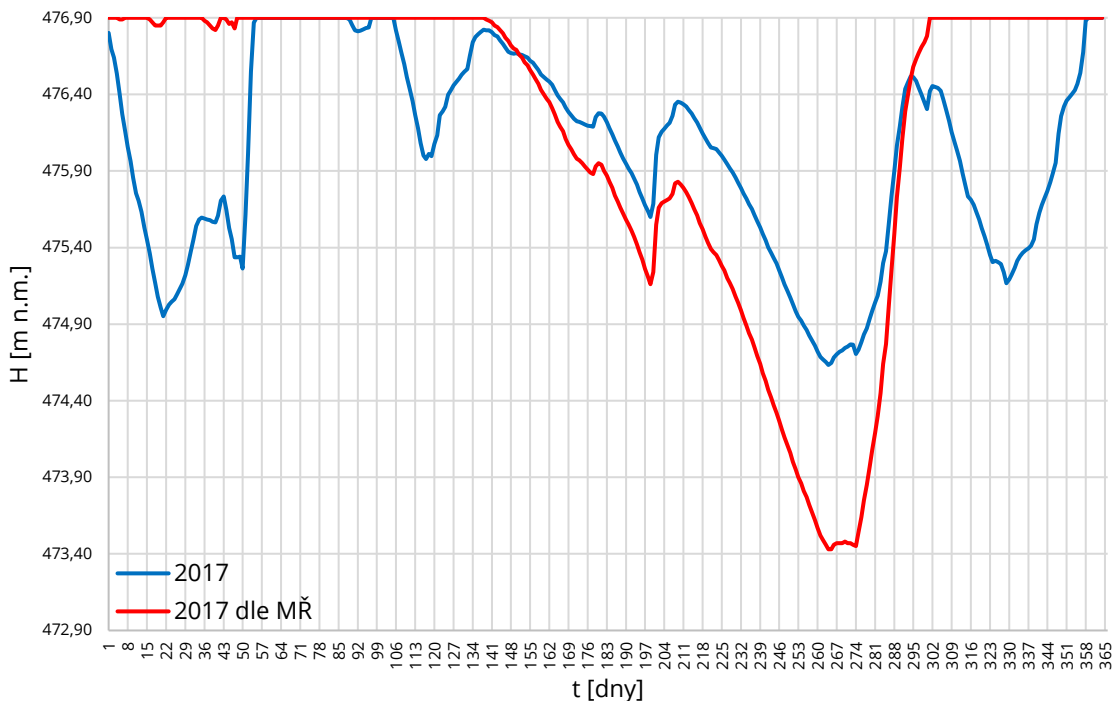
Druhou nezávislou osobou je student oboru vodního hospodářství obcí na fakultě stavební VUT v Brně. Řízení nádrže a provoz MVE není jeho prioritou studia. Avšak má ohledně této problematiky obecné znalosti.

Při simulaci vycházel z výsledných doplňujících pravidel a pro první 3 týdny zvolil maximální odtok tak, jak se nabízelo dle navrženého grafu. Následně si dle polohy hladiny zvolil referenční rok, který této hladině odpovídal. Tímto referenčním rokem byl suchý rok 2015 s kalendářním ročním průtokem $Q_r = 1,005 \text{ m}^3/\text{s}$. Vycházel tedy z hodnot odtoků pro tento referenční rok. Během simulace pak kontroloval polohu hladiny a porovnával ji s vývojem hladiny v referenčním roce. Na základě její polohy pak zvýšil či snížil výsledný odtok na MVE. Tímto postupem odsimuloval celé období a získal následující výsledky.

Tab. 31 - Výsledné sledované hodnoty – subjekt 2

Rok	CTZ _{návrh} [Kč]	H _{min} [m n. m.]	H _{konec} [m n. m.]	ΔTZ [Kč]
2017	1 291 857	474,63	476,90	80 842

Z tabulky 31 vidíme, že subjekt 2 dosáhl lehce vyššího zisku než subjekt 1 a během simulace dosáhl vyšší H_{min} . Subjekt svým řízením dosáhl teoretického zisku cca 81 tis. Kč, což je asi o 10 tis. Kč více než u subjektu 1. Průběh hladiny během simulace je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. č. 15 - Průběh hladiny během simulace – subjekt 2

Na obrázku 15 pozorujeme podobnou rozkolísanost hladiny během simulace jako při simulaci u subjektu 1. Podobnost je způsobena využitím suchého referenčního roku u obou subjektů. Subjekt 2 ale nedosahuje tak velkých poklesů hladiny jako subjekt 1. Z toho lze usoudit, že volil nižší hodnoty odtoků v průběhu roku. Ke konci roku pak využil zásobní prostor pro vytvoření vyššího teoretického zisku ze zimního období. Zariskoval, že nedodrží podmínku jednoletého řízení, tj. naplnění nádrže na konci roku. Nádrž se podařilo naplnit až v posledním týdnu. Jedná se o velké riziko, že se nádrž nestihne naplnit a téměř se tak v během této simulace stalo. Nádrž se naplnila až v posledním kalendářním týdnu roku. Zvýšením odtoků $O_{MVE,i}$ ke konci roku dosáhl subjekt 2 vyššího teoretického zisku než subjekt 1. Zda toto navýšení teoretického zisku odpovídá riziku nenaplnění nádrže na konci roku je otázka, kterou si musí provozovatel VD a MVE položit.

5.2.1 Vyhodnocení

Dva nezávislé subjekty provedly simulaci provozu nádrže Mostiště pro rok 2017 pomocí navržených doplňujících pravidel řízení. Rok 2017 se svým kalendářním ročním průtokem $Q_r = 1,072 \text{ m}^3/\text{s}$ řadí dle tabulky 14 mezi málo vodné roky. Očekávaly se tedy podobné výsledky jako pro referenční rok 2011 ($Q_r = 1,161 \text{ m}^3/\text{s}$). V referenčním roce 2011 bylo dosaženo dle tabulky 25 teoretického zisku $\Delta TZ \approx 53$ tis. Kč.

Oba subjekty zvolily svůj osobní přístup k použití doplňujících pravidel a dosáhly tak kladného teoretického zisku. Subjekt 1 se striktně držel navržených hodnot, které případně navyšoval v období nedostatku vody v nádrži. Subjekt 2 použil navržené $O_{MVE,i}$ jako výchozí hodnoty pro jeho úvahu. Na základě polohy hladiny pak velikosti odtoků upravoval.

Rok 2017 byl v průměru méně vodný, a přesto oba subjekty dosáhly vyššího teoretického zisku než v referenčním roce 2011. Subjekt 1 dosáhl teoretického zisku $\Delta TZ \approx 71$ tis. Kč a subjekt 2 $\Delta TZ \approx 81$ tis. Kč. Vyššího ΔTZ bylo dosaženo i při nižším poklesu hladiny než v méně vodném referenčním roce 2011. V simulaci u obou subjektů se dosáhlo dokonce i nižšího poklesu hladiny než při využití manipulačního řádu. Tím bylo docíleno především tak, že navržená doplňující pravidla umožňují využít hodnotu odtoku z 2. regulačního stupně aktuálního MŘ VD Mostiště, i když je v nádrži dostatek vody pro 1. regulační stupeň.

Oba subjekty splnily podmínku jednoletého řízení, tj. plné nádrže na konci roku. Také nedošlo k většímu dennímu (i týdennímu) poklesu hladiny v nádrži, než kolik dovoluje aktuální MŘ. Obě simulace tak proběhly úspěšně a s kladnými výsledky. Lze tedy navržená doplňující pravidla řízení považovat za vhodný prostředek k řízení nádrže s cílem maximalizovat zisk z provozu MVE. Jedná se však pouze o doplňující pravidla získaná pomocí zjednodušených postupů a jejich využití se může jevit více, či méně

vhodné v určitých situacích. Například z optimalizace referenčních roků vyplynulo, že navržená doplňující pravidla řízení nejsou vhodná k použití pro suché roky.

6 ZÁVĚR

Náplní práce bylo navrhnout doplňující pravidlo řízení hydroenergetické funkce nádrže s cílem maximalizovat zisk z provozu malé vodní elektrárny, a to na základě zjednodušené analýzy časového vývoje ceny elektrické energie na trhu.

V první části práce byly popsány použité metody, které byly potřebné k vytvoření simulačních modelů a návržení doplňujících pravidel řízení. Následně se práce věnovala zpracování vstupních časových řad, jimiž jsou reprezentovány průměrné denní ceny za elektrickou energii a průměrné denní přítoky do vodní nádrže Mostiště. Průběh vývoje ceny za elektrickou energii byl převzat z webového portálu <http://www.kurzy.cz/>. Průtoková řada byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem.

Téma práce je velice komplexní problém, který zahrnuje několik vědních disciplín, jako jsou třeba hydrologie nebo ekonomika. Z tohoto důvodu se práce následně věnuje zavedeným zjednodušením pro urychlení a usnadnění výpočtů. Jedná se jak o drobná zjednodušení jako například využití hrubého spádu pro výpočet výkonu místo čistého, tak i o zjednodušení vyššího dopadu na celkovou simulaci jako je zanedbání ztrát vody z nádrže.

V další části byla provedena zjednodušená analýza vývoje ceny elektrické energie na trhu. Vývoj ceny na trhu je reprezentován devítiletou časovou řadou denních cen za jednotku elektrické energie. Zjednodušená analýza spočívala v rozdělení sledovaných let na jednotlivé kalendářní týdny. Na základě denní ceny v daných rocích se pak každý den ohodnotil vahou R_d , která představuje relativní hodnotu zajímavosti denní ceny elektřiny vzhledem k maximální a minimální denní ceně v daném roce. Pomocí aritmetického průměru hodnot $R_{d,i}$ v každém kalendářním týdnu byla získána váha $R_{t,i}$ pro každý kalendářní týden. Tím bylo získáno 9 hodnot $R_{t,i}$ pro každý kalendářní týden. Aritmetickým průměrem z hodnot $R_{t,i}$ pro jednotlivé týdny se docílilo jednotného relativního pohybu ceny elektrické energie na trhu. Dle navržených intervalů se následně každý kalendářní týden kategorizoval dle jeho potenciální ziskovosti do čtyř kategorií.

Dále se práce věnuje sestavení dvou typů simulačních modelů pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel. První typ modelu simuluje provoz nádrže s využitím pravidel řízení stanovených manipulačním řádem VD Mostiště. Druhý typ modelu k simulaci provozu využívá navrženého pravidla řízení. Oba simulační modely pracují s denním krokem a vycházejí z plné nádrže. Výchozí hladinou je tedy kóta zásobního prostoru $M_z = 476,90$ m n. m. Součástí obou modelů je i výpočet hydroenergetického potenciálu. To zahrnuje výpočet hrubého spádu, vyrobeného výkonu, přepočtení výkonu na vyrobenou energii za den a výpočet denního teoretického zisku za vyrobenou energii.

Vytvořené simulační modely pak sloužily pro simulaci provozu nádrže při optimalizaci koeficientů k_i , pomocí kterých se získávaly výpočtové hodnoty pro použité navržené pravidlo řízení. Optimalizace koeficientů k_i byla prováděna subjektivně s cílem maximalizovat teoretický zisk za simulovaný referenční rok a dodržet stanovené podmínky. Těmito podmínkami se rozumí:

- naplnění nádrže na konci roku, protože se uvažuje s jednoletým řízením nádrže,
- v případě nenaplnění nádrže i při běžném provozu dle MŘ, dosáhnout pak stejné koncové hladiny (ve stanovené toleranci) jako při běžném provozu,
- nezasáhnout během simulace provozu do prostoru stálého nadržení.

Z optimalizovaného simulačního modelu pro každý referenční rok se pak získaly hodnoty odtoků na MVE $O_{MVE,i}$ pro jednotlivé kalendářní týdny. Tyto hodnoty, včetně příslušných dosažených hladin v nádrži na konci každého týdne, jsou pak graficky a tabelárně znázorněny. Vykreslením optimalizovaných hodnot pro jednotlivé referenční roky se získala navržená doplňující pravidla řízení pro maximalizaci zisku z provozu MVE na VD Mostiště.

Navržená doplňující pravidla řízení byla následně poskytnuta dvěma nezávislým subjektům, kteří se nepodílely na sestavení těchto pravidel. Odzkoušení výsledných pravidel bylo provedeno na simulačním modelu s využitím navrženého pravidla řízení. Tento model byl sestaven pro rok 2017 a stejně jako u předchozích vycházel z plné nádrže. Každý subjekt měl svůj vlastní přístup k použití navržených doplňujících pravidel.

První subjekt si udělal rozvahu o vodnosti jednotlivých roků. Na základě označení roku 2015 a 2016 za velmi suché očekával rok 2017 rovněž suchý. Z navržených pravidel řízení si pak zvolil referenční rok 2016 a navržené hodnoty $O_{MVE,i}$ pro tento rok využil pro simulaci provozu roku 2017. Při každém zadání hodnoty odtoku $O_{MVE,i}$ zkontroloval hladinu v nádrži na konci kalendářního týdne a porovnal ji s hladinou v nádrži získanou ze simulace provozu zvoleného referenčního roku 2016. Na základě polohy hladiny pak velikost odtoku navýšil či snížil. Druhý subjekt pro první 3 týdny zvolil maximální odtok a na základě polohy hladiny na konci třetího týdne zvolil referenční rok 2015. Pro každou volbu $O_{MVE,i}$ volil tedy hodnotu z referenčního roku 2015 a na základě porovnání hladin tuto hodnotu dle vlastního uvážení zvýšil či snížil. Výsledky od obou subjektů byly ziskové s teoretickým ziskem v podobné výši. Subjekt 1 dosáhl teoretického zisku $\Delta TZ \doteq 71$ tis. Kč a subjekt 2 $\Delta TZ \doteq 81$ tis. Kč. Z toho lze usoudit, že navržená pravidla jsou dostatečně přehledná a v praxi použitelná i při neznalosti jejich sestavení.

Navržená pravidla řízení jsou pouze doplňková ke stávajícím. Jedná se o doporučující vypočtené hodnoty pro vyšší zisk. Pokud provozovatel MVE a správce VD sezná, na základě jejich zkušeností, že je třeba hodnoty upravit z hydrologického, či jiného důvodu, je to možné. Nejedná se o striktní pravidla řízení. V případě podezření suchého roku je na základě výsledků této práce doporučeno navržená pravidla řízení

neaplikovat. V období suchého roku dochází k velmi nízkému teoretickému zisku za cenu velkého úbytku vody, a to není z ekonomického hlediska vhodné.

Na závěr lze tedy říci, že bylo dosaženo vytyčených cílů v úvodu práce. Z výsledků získaných od nezávislých subjektů lze usoudit, že práce má jistý potenciál. V práci však bylo využito několika zjednodušení při výpočtech a zpracování vstupních dat. Pohybujeme se tedy stále na teoretické hladině. Jedná se však o velmi zajímavé téma, které by mohlo být velkým přínosem v oblasti hydroenergetiky z ekonomického pohledu, a proto by bylo velice vhodné v dané problematice pokračovat. Postupně tak eliminovat zavedená zjednodušení a ověřit návrh a potenciál pravidel na jiných nádržích s průtočnou MVE.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WAGNER, Vladimír. Nejvyužívanější obnovitelný zdroj světa. Vodní elektrárny jako důležitý zdroj u nás i ve světě. In: *O Energetice* [online]. 27. srpen 2018 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/nejvyuzivanejsi-obnovitelny-zdroj-sveta-vodni-elektrarny-jako-dulezity-zdroj-u-nas-i-ve-svete/>
- [2] *Manipulační řád: VD Mostišťe na Oslavě v km 65,948* [online]. Jihlava, 2013.
- [3] BEDNÁŘ, Martin. *Řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže Mostišťe*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
- [4] SALAVEC, Jiří. Trh s elektřinou – specifika, účastníci trhu a rozdělení. In: *O Energetice* [online]. 9. červen 2017 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/trh-s-elektrinou/trh-s-elektrinou/>
- [5] CIHLÁŘ, Jan. Investice do decentralních zdrojů energie – 3. díl: Malá vodní elektrárna. In: *O Energetice* [online]. 28. říjen 2015 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/investice-do-decentralnich-zdroju-energie-3-dil-mala-vodni-elektrarna>
- [6] *Vodní nádrž Mostišťe*. In: *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_n%C3%A1dr%C5%BE_Mosti%C5%A1t%C4%9B
- [7] *Povodí Moravy: VD Mostišťe* [online]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/mostiste/>
- [8] STARÝ, Miloš. *Nádrže a vodohospodářské soustavy: MODUL 01* [online]. 2006.
- [9] ŘÍHA, J. a kol. *Hydrotechnické stavby II*. Brno: VUT, 2006, 103 s.
- [10] *Kurzy.cz* [online]. 2019. Dostupné také z: <https://www.kurzy.cz/>
- [11] *Power Exchange Central Europe, a.s.* [online]. 2019. Dostupné také z: <http://www.pxe.cz/>

8 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 - Situace VN Mostiště	12
Obr. č. 2 - Přibližná poloha limnigrafických stanic	14
Obr. č. 3 - Dispečerský graf VD Mostiště, vzor převzat z [2]	16
Obr. č. 4 - Kategorizace týdnů	28
Obr. č. 5 - Schematizace nádrže.....	29
Obr. č. 6 - Grafické znázornění průběhu hladiny během simulace v ref. roku 2010 ...	38
Obr. č. 7 - Ukázka výsledných navržených odtoků a průběhů hladin pro ref. roky	39
Obr. č. 8 - Průběh hladiny během simulace v ref. roce 2010.....	41
Obr. č. 9 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2009	43
Obr. č. 10 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2014	45
Obr. č. 11 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2011	46
Obr. č. 12 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2015	48
Obr. č. 13 - Průběh hladiny během simulace v ref. roku 2016	50
Obr. č. 14 - Průběh hladiny během simulace – subjekt 1	52
Obr. č. 15 - Průběh hladiny během simulace – subjekt 2.....	53

9 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 - Základní hydrologické údaje [2]	15
Tab. 2 - N-leté průtoky [2]	15
Tab. 3 - M-denní průtoky [2]	15
Tab. 4 - Mezní hodnoty a tolerance [2]	16
Tab. 5 - Dvoustupňový dispečerský graf (tabelárně) [2].....	17
Tab. 6 - Ukázka "přechodného" týdne.....	25
Tab. 7 - Ukázka přiřazení váhy R_d	26
Tab. 8 - Ukázka přiřazení váhy R_t	26
Tab. 9 - Ukázka stanovení výsledné váhy R_t pro prvních 10 týdnů	27
Tab. 10 - Ukázka výsledné kategorizace týdnů při rozsahu intervalu $\pm 5\%$	28
Tab. 11 - Ukázka řízení odtoku z nádrže pomocí simulačního modelu.....	31
Tab. 12 - Ukázka výpočtu P , E_d a TZ_d	32
Tab. 13 - Ukázka výpočtu odtoku dle navrženého pravidla řízení	34
Tab. 14 - Přehled a seskupení kalendářních Q_r	36
Tab. 15 - Roky, pro které existuje časová řada ceny elektřiny.....	36
Tab. 16 - Ukázka výsledných sledovaných hodnot referenčního roku.....	38
Tab. 17 - Ukázka tabelární interpretace navržených odtoků.....	39
Tab. 18 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2010.....	40
Tab. 19 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2010.....	40
Tab. 20 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2009.....	42
Tab. 21 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2009.....	42
Tab. 22 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2014.....	43
Tab. 23 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2014.....	44
Tab. 24 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2011	45
Tab. 25 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2011.....	46
Tab. 26 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2015.....	47
Tab. 27 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2015.....	47
Tab. 28 - Optimalizované koeficienty k_i pro ref. rok 2016.....	49
Tab. 29 - Výsledné sledované hodnoty pro ref. rok 2016.....	49

Tab. 30 - Výsledné sledované hodnoty – subjekt 1	51
Tab. 31 - Výsledné sledované hodnoty – subjekt 2	53

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 1–13

Příloha č. 2 – Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 14–26

Příloha č. 3 – Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 27–39

Příloha č. 4 – Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 40–53

Příloha č. 5a – Doplnující pravidla pro referenční rok 2010 - $Q_r = 2,730 \text{ m}^3/\text{s}$

Příloha č. 5b – Doplnující pravidla pro referenční rok 2009 - $Q_r = 1,810 \text{ m}^3/\text{s}$

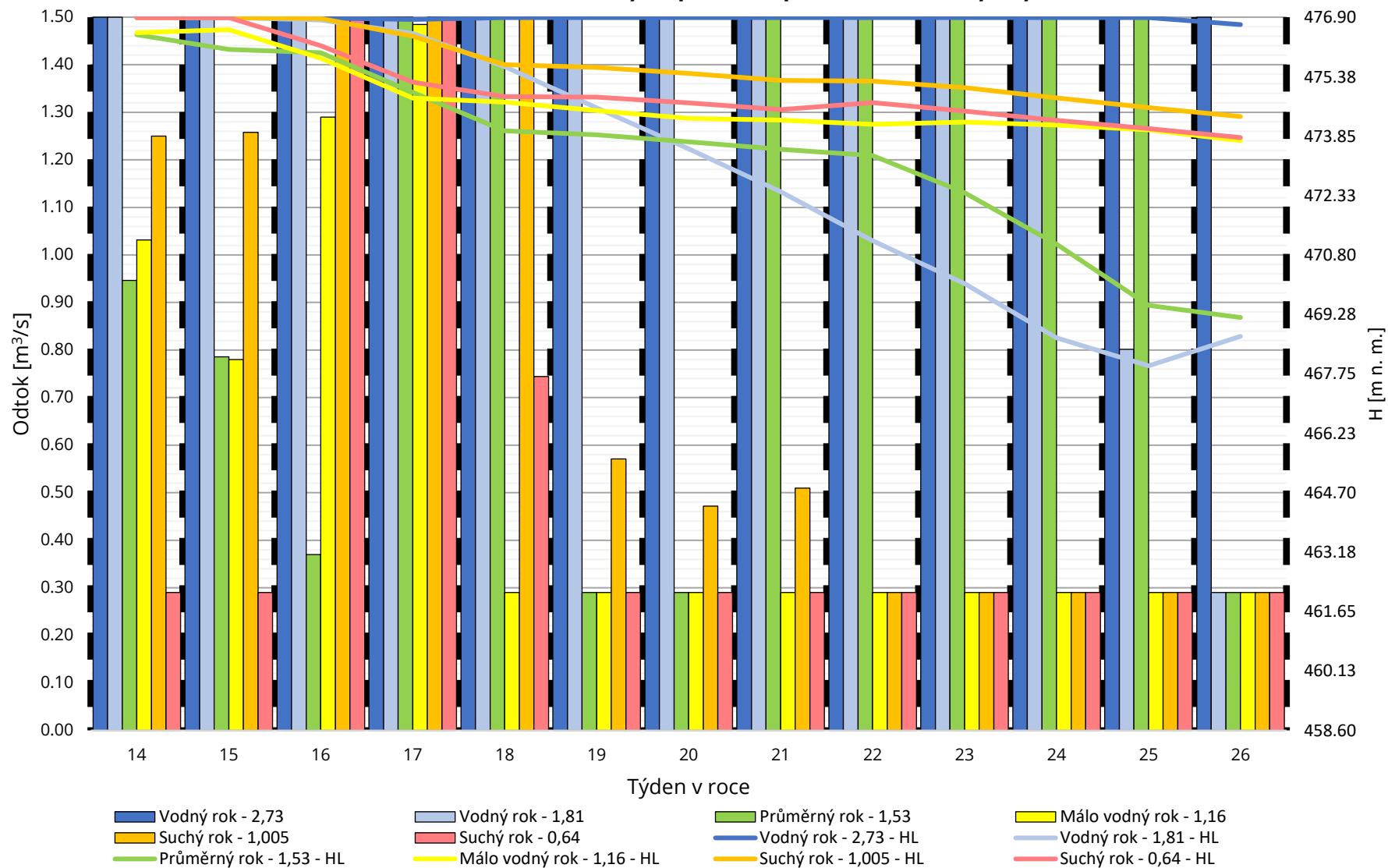
Příloha č. 5c – Doplnující pravidla pro referenční rok 2014 - $Q_r = 1,530 \text{ m}^3/\text{s}$

Příloha č. 5d – Doplnující pravidla pro referenční rok 2011 - $Q_r = 1,160 \text{ m}^3/\text{s}$

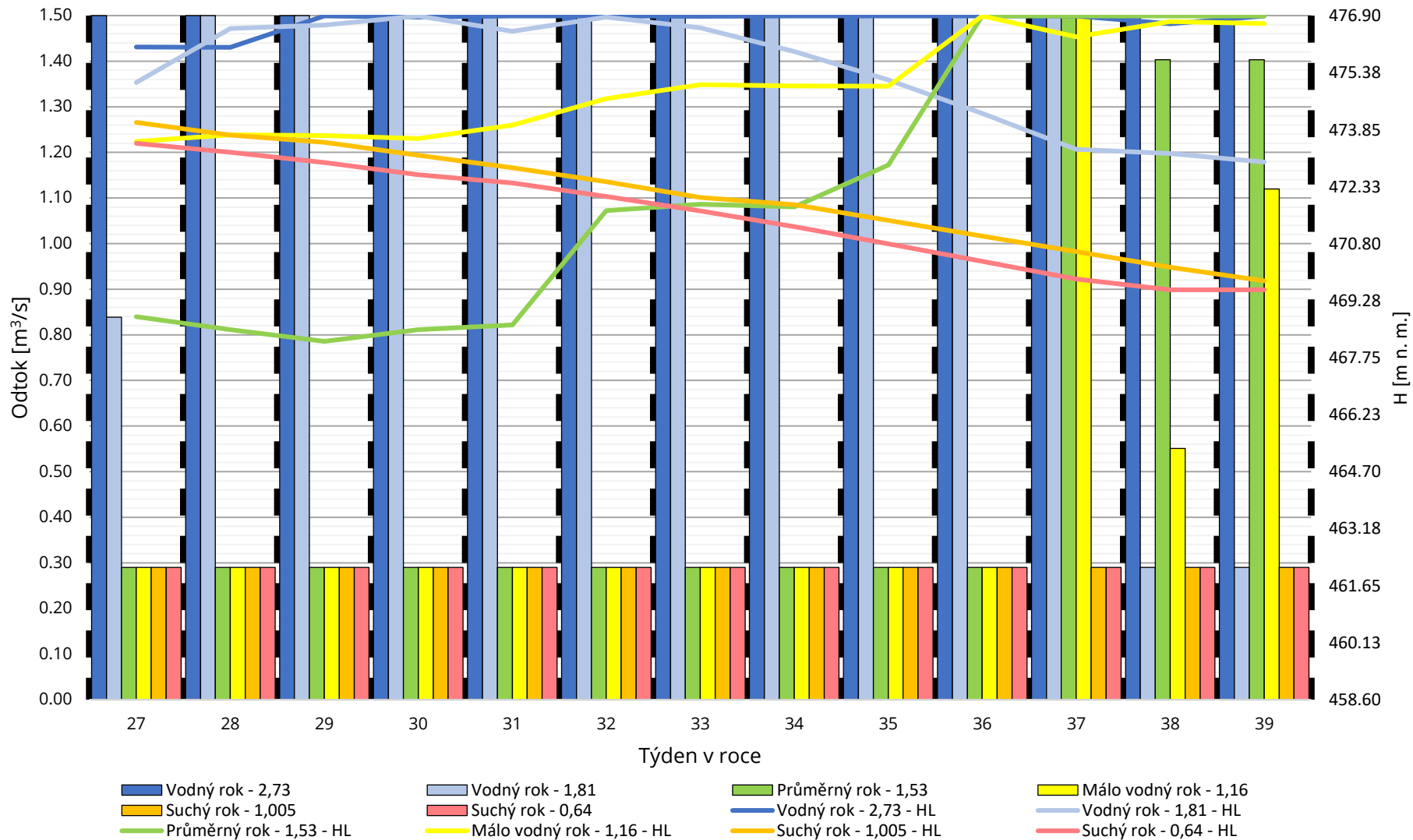
Příloha č. 5e – Doplnující pravidla pro referenční rok 2015 - $Q_r = 1,005 \text{ m}^3/\text{s}$

Příloha č. 5f – Doplnující pravidla pro referenční rok 2016 - $Q_r = 0,640 \text{ m}^3/\text{s}$

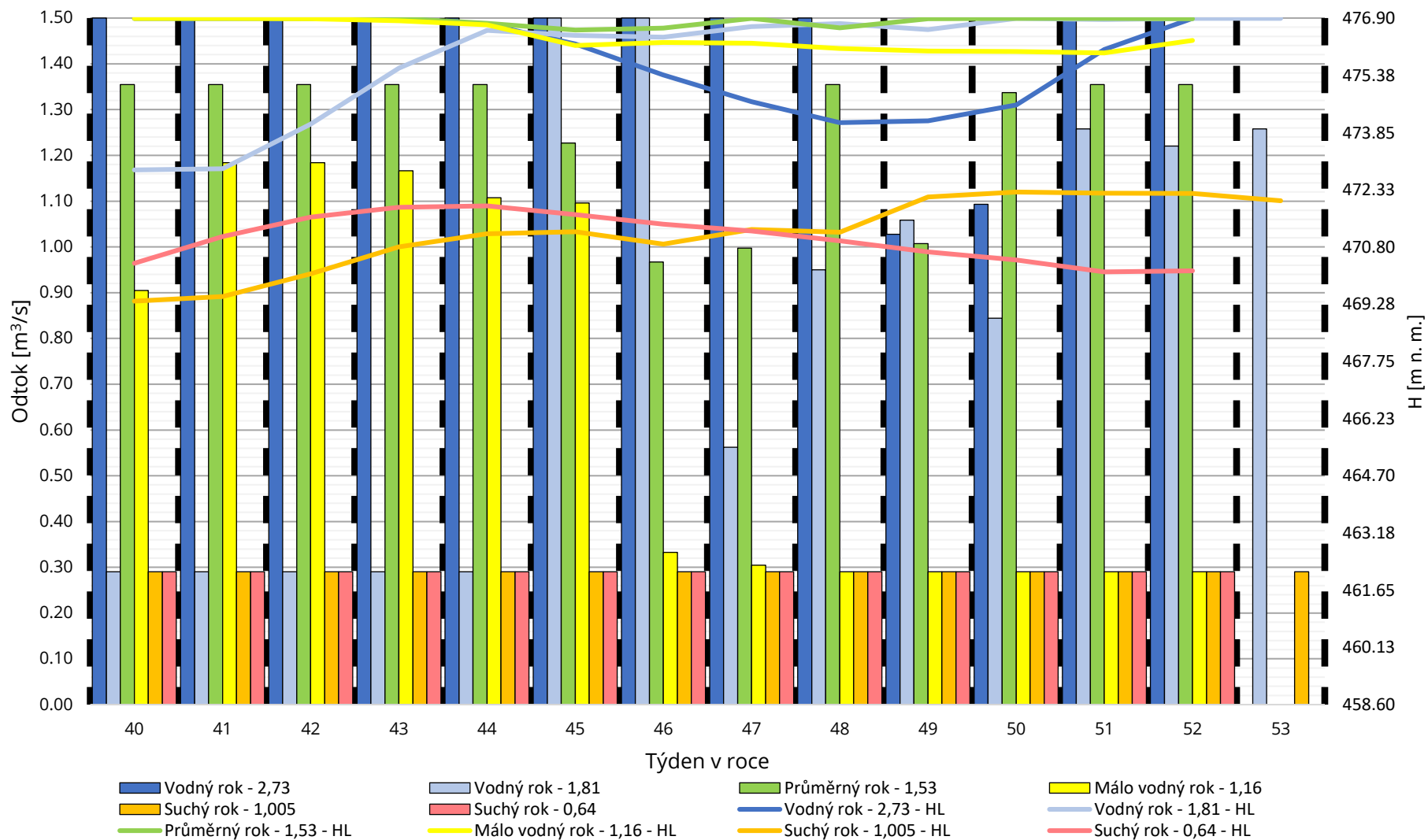
PŘÍLOHA Č. 2 - Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 14 - 26



PŘÍLOHA Č. 3 - Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 27 - 39



PŘÍLOHA Č. 4 - Grafické znázornění navržených pravidel pro kalendářní týdny 40 - 53



PŘÍLOHA Č. 5a - Doplnující pravidla pro referenční rok 2010 - $Q_r = 2.730 \text{ m}^3/\text{s}$

VD Mostiště

$M_z =$	476.90	m n. m.
$V_z =$	10 384 200	m^3

Týden	Referenční rok 2010		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
1	1.50	476.90	10 384 200
2	1.50	476.78	10 284 840
3	1.50	476.59	10 120 680
4	1.50	476.43	9 992 808
5	1.50	476.24	9 835 560
6	1.50	476.04	9 666 216
7	1.50	475.75	9 432 936
8	1.50	476.05	9 675 720
9	1.50	476.90	10 384 200
10	1.50	476.90	10 384 200
11	1.50	476.90	10 384 200
12	1.50	476.90	10 384 200
13	1.50	476.90	10 384 200
14	1.50	476.90	10 384 200
15	1.50	476.90	10 384 200
16	1.50	476.89	10 374 696
17	1.50	476.85	10 345 320
18	1.50	476.90	10 384 200
19	1.50	476.90	10 384 200
20	1.50	476.90	10 384 200
21	1.50	476.90	10 384 200
22	1.50	476.90	10 384 200
23	1.50	476.90	10 384 200
24	1.50	476.90	10 384 200
25	1.50	476.90	10 384 200
26	1.50	476.72	10 234 728
27	1.50	476.07	9 690 408

Týden	Referenční rok 2010		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
28	1.50	476.06	9 680 904
29	1.50	476.90	10 384 200
30	1.50	476.87	10 358 280
31	1.50	476.90	10 384 200
32	1.50	476.90	10 384 200
33	1.50	476.89	10 376 424
34	1.50	476.90	10 384 200
35	1.50	476.90	10 384 200
36	1.50	476.90	10 384 200
37	1.50	476.90	10 384 200
38	1.50	476.69	10 210 536
39	1.50	476.90	10 384 200
40	1.50	476.90	10 384 200
41	1.50	476.90	10 384 200
42	1.50	476.90	10 384 200
43	1.50	476.90	10 358 280
44	1.50	476.74	10 251 144
45	1.50	476.22	9 812 232
46	1.50	475.39	9 153 864
47	1.50	474.68	8 607 816
48	1.50	474.12	8 187 048
49	1.03	474.17	8 226 672
50	1.09	474.59	8 535 984
51	1.50	476.07	9 693 744
52	1.50	476.90	10 384 200
53	-	-	-

PŘÍLOHA Č. 5b - Doplnující pravidla pro referenční rok 2009 - $Q_r = 1.810 \text{ m}^3/\text{s}$

VD Mostiště

$M_z =$	476.90	m n. m.
$V_z =$	10 384 200	m^3

Týden	Referenční rok 2009		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
1	1.50	476.24	9 832 968
2	1.50	475.45	9 197 928
3	1.50	474.49	8 459 208
4	1.50	473.70	7 891 560
5	1.50	472.68	7 182 216
6	1.50	472.11	6 808 968
7	1.50	471.80	6 605 064
8	1.33	471.25	6 259 142
9	0.29	471.73	6 564 134
10	0.29	476.90	10 384 200
11	1.50	476.90	10 384 200
12	1.50	476.90	10 384 200
13	1.50	476.90	10 384 200
14	1.50	476.90	10 384 200
15	1.50	476.90	10 384 200
16	1.50	476.84	10 334 952
17	1.50	476.49	10 037 736
18	1.50	475.64	9 349 992
19	1.50	474.58	8 530 920
20	1.50	473.53	7 769 736
21	1.50	472.43	7 015 464
22	1.50	471.17	6 211 080
23	1.50	470.07	5 550 120
24	1.50	468.68	4 771 656
25	0.80	467.96	4 393 948
26	0.29	468.72	4 793 980
27	0.84	475.12	8 939 452

Týden	Referenční rok 2009		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
28	1.50	476.56	10 095 484
29	1.50	476.66	10 180 156
30	1.50	476.90	10 384 200
31	1.50	476.49	10 037 736
32	1.50	476.87	10 360 872
33	1.50	476.58	10 112 904
34	1.50	475.95	9 598 824
35	1.50	475.19	8 997 480
36	1.50	474.29	8 316 648
37	1.50	473.33	7 628 904
38	0.29	473.22	7 552 872
39	0.29	472.99	7 391 304
40	0.29	472.86	7 305 768
41	0.29	472.89	7 326 504
42	0.29	474.08	8 163 720
43	0.29	475.57	10 384 200
44	0.29	476.58	10 112 904
45	1.50	476.45	10 003 176
46	1.50	476.40	9 963 432
47	0.56	476.68	10 197 913
48	0.95	476.76	10 263 577
49	1.06	476.60	10 133 977
50	0.84	476.90	10 384 200
51	1.26	476.87	10 361 387
52	1.22	476.90	10 384 200
53	1.26	476.90	10 384 200

PŘÍLOHA Č. 5c - Doplnující pravidla pro referenční rok 2014 - $Q_r = 1.530 \text{ m}^3/\text{s}$

VD Mostiště

$M_z =$	476.90	m n. m.
$V_z =$	10 384 200	m^3

Týden	Referenční rok 2014		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
1	1.50	476.30	9 878 760
2	1.50	475.58	9 295 560
3	1.50	474.69	8 609 544
4	1.50	474.37	8 375 400
5	1.50	473.83	7 983 144
6	0.29	474.11	8 184 456
7	0.29	474.88	8 754 696
8	0.29	475.55	9 274 824
9	0.29	476.81	10 305 576
10	1.27	476.64	10 163 568
11	1.09	476.53	10 074 699
12	0.89	476.90	10 384 200
13	1.40	476.57	10 108 079
14	0.95	476.46	10 010 763
15	0.79	476.08	9 700 587
16	0.37	476.00	9 632 557
17	1.50	474.98	8 831 629
18	1.50	473.99	8 092 909
19	0.29	473.89	8 022 061
20	0.29	473.71	7 893 671
21	1.50	473.52	7 761 479
22	1.50	473.36	7 650 887
23	1.50	472.40	6 995 111
24	1.50	471.08	6 152 711
25	1.50	469.51	5 224 775
26	0.29	469.20	5 054 567
27	0.29	468.85	4 859 475

Týden	Referenční rok 2014		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
28	0.29	468.50	4 672 160
29	0.29	468.19	4 514 048
30	0.29	468.50	4 675 616
31	0.29	468.63	4 745 600
32	0.29	471.69	6 535 808
33	0.29	471.86	6 648 128
34	0.29	471.79	6 602 336
35	0.29	472.91	7 340 192
36	0.29	476.90	10 384 200
37	1.50	476.90	10 384 200
38	1.40	476.90	10 384 200
39	1.40	476.90	10 384 200
40	1.35	476.90	10 384 200
41	1.35	476.90	10 384 200
42	1.35	476.90	10 384 200
43	1.35	476.90	4 675 616
44	1.35	476.77	10 277 552
45	1.23	476.59	10 120 491
46	0.97	476.64	10 168 011
47	1.00	476.90	10 384 200
48	1.35	476.65	10 173 947
49	1.01	476.89	10 373 531
50	1.34	476.90	10 384 200
51	1.35	476.90	10 384 200
52	1.35	476.89	10 378 603
53	-	-	-

PŘÍLOHA Č. 5d - Doplnující pravidla pro referenční rok 2011 - $Q_r = 1.160 \text{ m}^3/\text{s}$

VD Mostiště

$M_z =$	476.90	m n. m.
$V_z =$	10 384 200	m^3

Týden	Referenční rok 2011		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
1	1.50	476.90	10 384 200
2	1.50	476.90	10 384 200
3	1.50	476.90	10 384 200
4	1.50	476.85	10 342 728
5	1.50	476.78	10 286 568
6	1.50	476.90	10 384 200
7	1.50	476.79	10 289 160
8	1.50	476.27	9 857 160
9	0.46	476.48	10 030 466
10	0.75	476.32	9 897 904
11	0.53	476.90	10 384 200
12	1.33	476.90	10 384 200
13	1.33	476.69	10 203 266
14	1.03	476.51	10 051 202
15	0.78	476.59	10 125 506
16	1.29	475.86	9 521 609
17	1.48	474.83	8 722 003
18	0.29	474.73	8 640 787
19	0.29	474.51	8 474 035
20	0.29	474.31	8 330 092
21	0.29	474.27	8 304 172
22	0.29	474.16	8 220 364
23	0.29	474.22	8 267 020
24	0.29	474.14	8 208 268
25	0.29	474.02	8 116 684
26	0.29	473.74	7 916 236
27	0.29	473.54	7 776 268

Týden	Referenční rok 2011		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
28	0.29	473.72	7 905 868
29	0.29	473.70	7 885 132
30	0.29	473.62	7 828 972
31	0.29	473.98	8 089 900
32	0.29	474.69	8 610 892
33	0.29	475.06	8 896 876
34	0.29	475.03	8 867 500
35	0.29	475.02	8 862 316
36	0.29	476.90	10 384 200
37	1.50	476.34	9 912 456
38	0.55	476.75	10 256 834
39	1.12	476.70	10 215 362
40	0.90	476.90	10 384 200
41	1.18	476.90	10 384 200
42	1.18	476.89	10 373 681
43	1.17	476.84	7 828 972
44	1.11	476.73	10 242 348
45	1.10	476.18	9 780 770
46	0.33	476.26	9 852 482
47	0.30	476.24	9 831 464
48	0.29	476.10	9 714 824
49	0.29	476.03	9 658 664
50	0.29	476.02	9 649 160
51	0.29	475.98	9 622 376
52	0.29	476.31	9 887 624
53	-	-	-

PŘÍLOHA Č. 5e - Doplnující pravidla pro referenční rok 2015 - $Q_r = 1.005 \text{ m}^3/\text{s}$

VD Mostiště

$M_z =$	476.90	m n. m.
$V_z =$	10 384 200	m^3

Týden	Referenční rok 2015		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
1	1.50	476.68	10 194 984
2	1.50	476.90	10 384 200
3	1.50	476.90	10 384 200
4	1.50	476.90	10 384 200
5	1.50	476.90	10 384 200
6	1.50	476.87	10 360 008
7	1.50	476.84	10 334 088
8	1.50	476.85	10 345 320
9	1.19	476.90	10 384 200
10	1.26	476.90	10 384 200
11	1.26	476.90	10 384 200
12	1.26	476.89	10 376 767
13	1.25	476.89	10 379 385
14	1.25	476.90	10 384 200
15	1.26	476.90	10 384 200
16	1.50	476.88	10 366 920
17	1.50	476.42	9 981 576
18	1.50	475.69	9 388 872
19	0.57	475.62	9 328 760
20	0.47	475.47	9 209 528
21	0.51	475.29	9 074 236
22	0.29	475.27	9 060 412
23	0.29	475.10	8 923 900
24	0.29	474.84	8 728 377
25	0.29	474.59	8 534 841
26	0.29	474.36	8 365 497
27	0.29	474.05	8 138 265

Týden	Referenční rok 2015		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
28	0.29	473.71	7 892 889
29	0.29	473.52	7 759 833
30	0.29	473.17	7 519 641
31	0.29	472.84	7 292 409
32	0.29	472.46	7 036 665
33	0.29	472.04	6 759 321
34	0.29	471.85	6 640 089
35	0.29	471.43	6 372 249
36	0.29	471.01	6 108 729
37	0.29	470.59	5 853 849
38	0.29	470.17	5 604 153
39	0.29	469.81	5 397 657
40	0.29	469.36	5 143 641
41	0.29	469.48	5 211 033
42	0.29	470.09	5 556 633
43	0.29	470.81	7 519 641
44	0.29	471.16	6 204 633
45	0.29	471.21	6 236 601
46	0.29	470.88	6 030 105
47	0.29	471.27	6 270 297
48	0.29	471.20	6 231 417
49	0.29	472.14	6 825 849
50	0.29	472.27	6 913 977
51	0.29	472.24	6 894 105
52	0.29	472.23	6 884 601
53	0.29	472.04	6 760 185

PŘÍLOHA Č. 5f - Doplnující pravidla pro referenční rok 2016 - $Q_r = 0.640 \text{ m}^3/\text{s}$

VD Mostiště

$M_z =$	476.90	m n. m.
$V_z =$	10 384 200	m^3

Týden	Referenční rok 2016		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
1	1.50	475.84	9 504 648
2	1.50	474.74	8 652 744
3	0.29	474.46	8 438 472
4	0.29	474.74	8 653 608
5	0.29	475.31	9 089 928
6	0.82	475.68	9 378 651
7	1.29	475.86	9 525 531
8	1.50	476.29	9 873 723
9	0.29	476.90	10 384 200
10	0.29	476.90	10 384 200
11	0.29	476.90	10 384 200
12	0.29	476.90	10 384 200
13	0.29	476.90	10 384 200
14	0.29	476.90	10 384 200
15	0.29	476.90	10 384 200
16	1.50	476.18	9 782 856
17	1.50	475.24	9 032 040
18	0.74	474.87	8 751 391
19	0.29	474.86	8 739 295
20	0.29	474.71	8 629 567
21	0.29	474.54	8 497 375
22	0.29	474.72	8 635 615
23	0.29	474.50	8 467 135
24	0.29	474.26	8 295 199
25	0.29	474.05	8 141 407
26	0.29	473.82	7 977 247
27	0.29	473.49	7 736 191

Týden	Referenční rok 2016		
	$O_{MVE,i}$ [m^3/s]	H [m n. m.]	V [m^3]
28	0.29	473.25	7575486.93
29	0.29	472.98	7385406.93
30	0.29	472.65	7160766.93
31	0.29	472.43	7014750.93
32	0.29	472.07	6778878.93
33	0.29	471.68	6533502.93
34	0.29	471.26	6264798.93
35	0.29	470.80	5981406.93
36	0.29	470.33	5698878.93
37	0.29	469.86	5424126.93
38	0.29	469.57	5261694.93
39	0.29	469.57	5258238.93
40	0.29	470.37	5723934.93
41	0.29	471.08	6152478.93
42	0.29	471.60	6479934.93
43	0.29	471.86	7160766.93
44	0.29	471.90	6668286.93
45	0.29	471.67	6526590.93
46	0.29	471.41	6360702.93
47	0.29	471.23	6245790.93
48	0.29	470.97	6086814.93
49	0.29	470.67	5906238.93
50	0.29	470.46	5774910.93
51	0.29	470.14	5588286.93
52	0.29	470.17	5609022.93
53	-	-	-