



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

ŘÍZENÍ HYDROENERGETICKÉ FUNKCE VODNÍ NÁDRŽE MOSTIŠTĚ

HYDROPOWER CONTROL OF MOSTIŠTĚ RESERVOIR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Bednář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL MENŠÍK, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martin Bednář
Název	Řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže Mostiště
Vedoucí práce	Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

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. Manipulační řád pro vodní dílo Mostiště na Oslavě v km 65,948. Povodí Moravy s.p. 2013.
10. Aktuální a historické ceny elektřiny dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektriny-graf-vyvoje-ceny/>

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Úkolem bakalářské práce bude navrhnout zjednodušený způsob řízení hydroenergetické funkce nádrže Mostiště. Řízení bude navrženo s cílem maximalizovat zisk z provozu hydroelektrárny, a to na základě jednoduché analýzy časového průběhu ceny elektrické energie na trhu. Navržené řízení bude ve vybraném období zjednodušeně otestováno pomocí simulačního modelu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Úkolem bakalářské práce je navrhnout zjednodušený způsob řízení hydroenergetické funkce nádrže Mostiště. Řízení bude navrženo s cílem maximalizovat zisk z provozu hydroelektrárny, a to na základě jednoduché analýzy časového průběhu ceny elektrické energie na trhu. Navržené řízení bude ve vybraném období zjednodušeně otestováno pomocí simulačního modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nádrž, simulační model, simulace, hydroenergetická funkce, Mostiště, výkon, zisk, energie, řízení

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to propose a simplified way of controlling hydro-energetic function of the Mostiště reservoir. Controlling will be designed to maximize profit from the operation of the hydroelectric power plant and based on a simple analysis of the time course of the electricity price on the market. The proposed controlling will be simplified in the selected period using a simulation model.

KEYWORDS

Reservoir, simulation model, simulation, hydroenergetic function, Mostiště, power, profit, energy, control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Martin Bednář *Řízení hydroenergetické funkce vodní nádrže Mostišťe*. Brno, 2018. 63 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 18. 5. 2018

Martin Bednář
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

1	Úvod	2
1.1	Popis nádrže	3
1.1.1	Technické parametry	4
1.1.2	Malá vodní elektrárna.....	4
1.1.3	Základní hydrologické údaje	5
2	Cíl práce	7
3	Metody	8
3.1	Simulace	8
3.2	Simulační model	9
3.3	Řízení odtoku z nádrže.....	9
3.4	Dispečerský graf	11
3.5	Výpočet výkonu a výroby elektrické energie v MVE	12
4	Aplikace	13
4.1	Použitá vstupní data.....	13
4.1.1	Cena elektrické energie	13
4.1.2	Průtoky.....	14
4.2	Popis vytvoření simulačního modelu	15
4.3	Vytvoření pravidel řízení	19
4.3.1	Skupiny tříd.....	20
4.3.2	Pravidla řízení	27
5	Shrnutí výsledků.....	32
5.1	Varianta 1	32
5.2	Varianta 2	33
5.3	Varianta 3	44
5.4	Varianta 4	46
6	Závěr.....	52
7	Seznam použitých zdrojů	54
8	Seznam použitých obrázků	55
9	Seznam použitých tabulek	56

1 ÚVOD

Hledat stále nové způsoby mezi alternativními zdroji a jejich zdokonalování je stále důležitější a v dnešní době se na energii získanou z obnovitelných zdrojů klade velký důraz. Jedním z těchto zdrojů je právě neustále se obnovující koloběh vody v přírodě.

Využívání vodních toků se objevilo už ve středověku. Zprvu byl vodní proud využíván hlavně k dopravě, ale časem našel způsob využití i k pohonu mechanismů. To dalo za vznik vodních mlýnů. Další vývoj těchto pohonů byl na dlouhou dobu téměř zastaven až do 19. století, kdy přišla na svět první přetlaková turbína. Z tohoto vynálezu dále vznikaly jeho modifikace jako Francisova turbína, sestavena v roce 1847 nebo Peltonova turbína z roku 1880. Pro Českou republiku byl ovšem nejvýznamnější objev českého vědce Viktora Kaplana, který sestrojil Kaplanovu turbínu. Turbíny byly postupně vyvinuty neustálým zdokonalováním konstrukce vodních kol. Nyní mají účinnost až přes 90%. Jedná se dosud o nejdokonalejší vodní motory a dnes se používají právě tyto tři typy, zmíněné výše.

Vodní energii lze využít několika způsoby a to především umístění hydroelektrárny na vodních tocích, kde je potřebný spád vytvořen jezovou konstrukcí. Vedle této nejčastější a nejběžnější možnosti využití vodní energie se nabízejí i další možnosti pro získání energie, a to:

- Využití retenčních nádrží a rybníků, příp. jiných akumulčních nádrží s možností vhodného rozdílu hladin.
- Využití vodárenských objektů, vybudovaných pro účely zásobování pitnou nebo užitkovou vodou, kde je možno získat téměř konstantní vysoké spády.
- Rekonstrukce MVE se zastaralou technologií, což je více než polovina všech MVE, které jsou provozovány se soustrojími z let 1930 až 1950. modernizací lze získat další potenciál při nízké investici. [1]

V České republice mají největší podíl na výrobě elektrické energie s ohledem na typ obnovitelného zdroje (tj. voda) přečerpávací vodní elektrárny. Přečerpávací elektrárny v posledních letech, díky své rekordní výrobě elektrické energie v ČR, značně zvedly svůj podíl výroby z obnovitelných zdrojů. Díky této skutečnosti patřičně stoupl jejich význam. [2]

Prvotní elementární myšlenkou, která dala podnět pro vznik této bakalářské práce, byla otázka: „Když přečerpávací nádrže čerpají vodu zpět do horní nádrže za levnější náklady za elektrickou energii, s cílem využít hydroenergetický potenciál vícenásobně, bylo by možné tuto problematiku aplikovat i na průtočnou nádrž?“.

Pro naše potřeby chápeme vodní nádrží uměle vytvořenou přehradní hráz na vodním toku. Pokud vyjdeme ze zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), je vodní nádrž definována jako uměle vytvořený útvar povrchové vody, vymezené soustředěním povrchové vody v určitém prostředí. Součástí vodních nádrží jsou akumulární elektrárny, které patří mezi nejznámější typy vodních elektráren. Tato vodní díla se využívají nejen pro výrobu elektrické energie a k akumulaci vody, ale i pro stabilizaci průtoků říčních koryt, ochranu proti povodňovým vlnám a pro podporu využívání vodních toků k ekonomicky výhodné vodní dopravě. [3]

Pro ověření potenciálu myšlenky, vycházející z principu přečerpávacích vodních nádrží, byla zvolena izolovaná průtočná nádrž Mostišť. Protože u tohoto typu nádrže není možno přečerpávat vodu zpět, stejně jako u přečerpávacích vodních nádrží, musel se najít jiný způsob, jak tuto skutečnost nahradit. Jelikož elektrickou energii můžeme pouze vyrábět, ale nemůžeme ji spotřebovat s cílem vyšších zisků, klíčovým prvkem se stal vývoj ceny elektřiny na trhu. Když tento fakt shrneme do jedné věty, zněla by asi takto: „Pokud je cena elektřiny v daném období nízká, snížíme průtoky a pošetříme vodu v nádrži až do chvíle, kdy se cena zase zvedne a zvýšíme tím odtok na MVE a vyrobíme více elektřiny.“

Toto vedlo na zjednodušenou analýzu časového průběhu průměrné denní ceny elektrické energie na trhu a následného určení vhodného způsobu řízení s cílem dosáhnout, za určitých podmínek, co největšího zisku. Řízení je hledáno pomocí simulačního modelu, který je sestaven pro období let 2008-2016 a následně je otestováno simulačním modelem sestaveným pro rok 2017. Použitý simulační model je blíže popsán v kapitole 4.3 a určení způsobu řízení je popsáno v kapitole 4.4.

1.1 POPIS NÁDRŽE

Vodní nádrž Mostišť, zvaná též Mostišťská přehradní nádrž, leží na řece Oslavě severně od Velkého Meziříčí. Rozprostírá se na ploše cca 93 ha a její 340 m dlouhá sypaná hráz je schopna zadržet 11 937 000 m³ vody. Svojí kapacitou se řadí mezi středně velké přehrady v Česku. Správcem této nádrže je Povodí Moravy.[4]

Nádrž plní hned několik účelů:

- výroba elektrické energie ve vodní elektrárně Mostišť,
- snížení povodňových průtoků,
- vodárenský odběr,
- zajištění minimálního průtoku.

1.1.1 Technické parametry

Typ hráze:	sypaná kamenitá
Těsnění:	návodní sprašové těsnění
Výška hráze:	28,70 m
Šířka koruny:	5,80 m
Délka hráze v koruně:	292,00 m
Hladina stálého nadržení:	458,60 m n. m.
Stálé nadržení:	1,045 mil. m ³
Hladina zásobního prostoru:	476,90 m n. m.
Zásobní prostor:	9,339 mil. m ³
Hladina retenčního prostoru ovladatelného:	477,60 m n. m.
Prostor retenční ovladatelný:	0,944 mil. m ³
Hladina retenčního neovladatelného prostoru:	478,64 m n. m.
Prostor retenční neovladatelný:	0,944 mil. m ³
Maximální zásobní hladina:	476,90 m n. m.
Celkový objem nádrže:	11,937 mil. m ³
Typ bezpečnostního přelivu:	boční hrazený
Kóta přelivu:	477,60 m n. m.
Šířka přelivu:	55,30 m [5]

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 přiváděcího 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 přiváděného potrubí k turbíně, jejího uzávěru nebo vlastní turbíny. [5]

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

1.1.3 Základní hydrologické údaje

Hydrologické údaje vychází z manipulačního řádu VD Mostiště, které jsou převzaty z Českého hydrometeorologického ústavu Praha, pobočka Brno.

Tab. 1 - Základní hydrologické údaje [5]

Tok: O S L A V A	P R O F I L		
	Limnigraf Olší nad přehradou	Limnigraf Mostiště pod přehradou	Limnigraf 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
Č. hydrologického pořadí	4-16-02-021	4-16-02-021	4-16-02-047

Tab. 2 - N-leté průtoky [5]

N - let	P R O F I L				
	Limnigraf Dolní Bory nad přehradou	Hráz VD Mostiště - neovlivněné průtoky		Limnigraf Mostiště pod přehradou	Limnigraf 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 [5]

M - dní	P R O F I L		
	Limnigraf Dolní Bory nad přehradou	Limnigraf Mostiště pod přehradou	Limnigraf 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

2 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce je navrhnout zjednodušené pravidlo řízení hydroenergetické funkce nádrže Mostiště. Pravidlo řízení bude navrženo s cílem maximalizovat zisk z provozu malé vodní elektrárny, a to na základě zjednodušené analýzy časového vývoje ceny elektrické energie na trhu.

Bude vytvořen simulační model pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel. V tomto programu bude pomocí dostupných funkcí vytvořena posloupnost aritmetických a logických algoritmů umožňujících simulovat provoz nádrže. Provoz nádrže bude řešen v denním kroku.

Navržené pravidlo řízení pak bude otestováno na simulačním modelu s denním krokem pro období let 2008 – 2016 a vhodnost výsledků pak ověřena na simulačním modelu s denním krokem pro rok 2017.

3 METODY

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

3.1 SIMULACE

Simulaci lze definovat jako techniku, která umožňuje vyhodnotit následky nějakého rozhodnutí bez jeho uskutečnění v praxi. Pokud simulaci vztáhneme k problematice řešení zásobní funkce nádrže, můžeme simulaci popsat jako matematickou techniku, která napodobuje posloupnosti aritmetických a logických algoritmů provozu nádrže ve sledovaném časovém úseku $\langle t_0, t_n \rangle$, při zadané počáteční podmínce (plnění nádrže v čase t_0) a zadání omezujících podmínek (závisí na typu úlohy – např. okamžité plnění nádrže). Další nezbytnou podmínkou je rovněž znalost způsobu řízení odtoku z nádrže, tj. závislost řízeného odtoku na stavu vodních zdrojů, kde stavem vodních zdrojů rozumíme okamžitou velikost přítoku vody do nádrže Q a plnění zásobního prostoru V . Lze jej zapsat vektorem $\underline{S} = (V, Q)$. Takto definovaný stav nám popisuje okamžitou potenciální možnou kapacitu vodního zdroje, protože zahrnuje jak velikost okamžitého přítoku vodu, tak i objem vody v nádrži, který je momentálně k dispozici pro nalepšování odtoku.

Během simulace provozu se sleduje průběh kritériální funkce (dále kritéria), která je u izolované nádrže tvořena zejména technickými veličinami, ale může být tvořena i ekonomickými veličinami, případně souhrnem technických a ekonomických veličin. Takovýmto kritériem může být například zabezpečení, ale i náklady na realizaci nebo zisky.

Nástrojem pro simulaci provozu se užívá metoda postupně bilanční, která vychází ze základní rovnice nádrže. Pomocí této metody je simulace provozu znázorněna posloupností časových snímků všech řešených veličin na rozhraní jednotlivých časových intervalů Δt , jejichž velikost je volena v souladu s podklady řešení. Pro vlastní simulaci provozu je tedy nutno znát chronologickou řadu průměrných průtoků (dle potřeby měsíčních, denních, či ročních) podle délky voleného časového kroku Δt , ve kterém provádíme bilanci a požadavky na odtok vody z nádrže v průběhu řešeného období (může být konstantní, měnit se cyklicky v průběhu roku nebo se dynamicky měnit v průběhu celého období). Tento princip je shodný jak při řešení v reálných, tak i umělých průtokových řadách. [7]

3.2 SIMULAČNÍ MODEL

Principem simulačního modelu je volba hledané veličiny v zadané oblasti a v určitém kroku, která do řešení vstupuje jako parametr. Pro každou volenou hodnotu parametru opakovaně simulujeme novou variantu provozu nádrže a v ní vyhodnotíme sledované kritérium (zabezpečení). Z vyřešených vybereme tu variantu, ve které se kritérium se zadanou přesností shoduje s požadovanou hodnotou. V ní volený parametr se pak stává výsledkem řešení. Tato úloha vede na optimalizaci, ve které je neznámou řešený parametr a kritériem je rozdíl mezi vypočtenou hodnotou P a požadovanou P' zabezpečeností, který se minimalizuje.

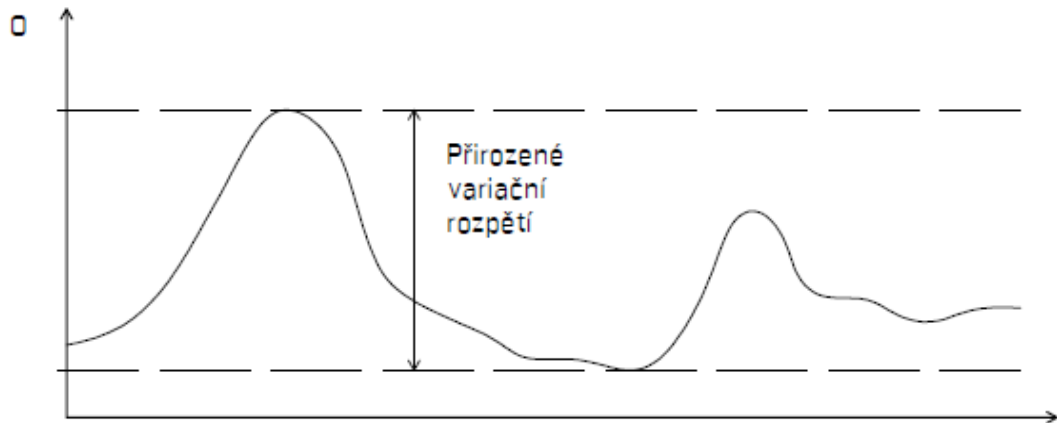
Výpočet je možno urychlit tím, že se řešení provede nejdříve na hrubé rozlišovací úrovni s hrubým krokem parametru. Výsledky se vyhodnotí, vymezí se zmenšená oblast, ve které s největší pravděpodobností leží hledaný parametr a v ní se provede následné dořešení na jemné rozlišovací úrovni s jemným krokem parametru. Uvedený postup se ve vodohospodářské terminologii nazývá klasickým simulačním modelem a v zásadě se jedná o použití mřížkové metody (grid method) při optimalizaci. Dále se dá výpočet urychlit tak, že se v průběhu výpočtu hledá vztah mezi voleným parametrem a hodnotou kritéria, na který se s další volbou kritéria v nové variantě pružně reaguje. Takto opjatá úloha je v podstatě iterací. [7]

3.3 ŘÍZENÍ ODTOKU Z NÁDRŽE

Řízením (regulováním) odtoku rozumíme cílevědomě prováděnou redistribuci odtoku, jejímž účelem je přizpůsobování odtokového režimu (průběhu odtoku) potřebám společnosti. Tato činnost je nutná proto, že přirozené rozdělení odtoku v průběhu určitého sledovaného období nemusí a v obecném případě ani nemůže být v souladu s potřebami plánovitě řízené činnosti společnosti, protože je výsledkem fungování složitého přírodního mechanismu, v podstatě fungování nezávislého na člověku. Zdůrazněním lidského činitele přerůstá tento obor z hydrologie do oblasti vodního hospodářství a svými důsledky do oblasti průmyslové ekonomie.

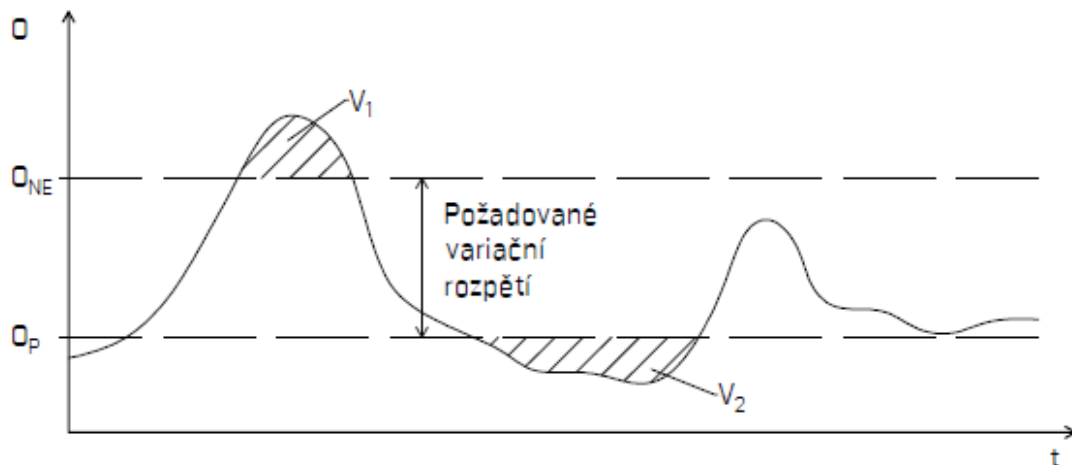
Předmětem hydrologické části řízení odtoku je analýza vztahu mezi přirozeným odtokovým režimem, prostředky jeho regulování a výsledným odtokovým režimem. Cílem je vyjádření vztahu takovými kvantitativními charakteristikami, které by umožnily objektivně hodnotit daný způsob řízení. Vlastní hodnocení, které je v podstatě hledáním optimální varianty regulování, je předmětem vodního hospodářství.

Pro řízení odtoku se u nás vžil výraz vyrovnání odtoku, vyplývající z toho, že se v obvyklých případech jedná o snižování nejvyšších a zvyšování nejnižších průtoků. Výsledkem požadovaného řízení odtoku je obecně zmenšení variačního rozpětí průtoků na požadovaný rozsah. Získáváme tak z přirozeného variačního rozpětí (obr. 1) požadované variační rozpětí (viz obr. 2).



Obr. 1 - Přirozené variační rozpětí odtoku, vzor převzat z [7].

Q – Odtok, t – Čas, Q_{NE} – Neškodný odtok, Q_P – Nalepšený odtok, V_1 – Nadbytek vody, který „uskladníme“ v nádrži na pokrytí poruch (V_2), V_2 – Vzniklá porucha vlivem nedostatku vody (plocha obrazce odpovídá objemu nedodané vody)



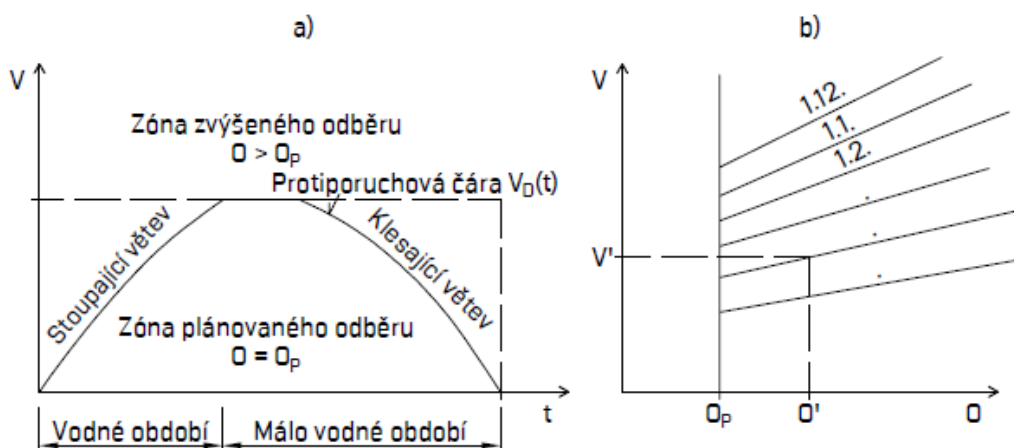
Obr. 2 - Požadované variační rozpětí odtoku, vzor převzat z [7].

Účelem řízení odtoku není však pouze vyrovnání odtoku, ale obecně jeho časová redistribuce (pokud je nástrojem řízení např. izolovaná nádrž) a redistribuce v čase a prostoru. Někdy je účelem řízení právě „rozkmitání“ odtoku, např. při denní regulaci pro špičkové vodní elektrárny, při nárazovém nalepšování pro plavbu, závlahy apod. V takovém případě má prostředek řízení odtoku funkci „rozdělovací“.[7]

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.

Dispečerský graf předepisuje funkci $O(V(t))$ v základní rovnici nádrže (převážně pro jeden rok) na základě dosažených výsledků při simulaci v historickém období. Na obrázku 3 jsou uvedeny dva základní dispečerské grafy. Dispečerský graf na obrázku 3a) je znázorněn protiporuchovou čarou $V_D(t)$, která omezuje zdola oblast zvýšeného odběru, kde může být $O > O_P$. Nestanoví však, o kolik je možno O_P zvýšit. Proto je nutno pro zvýšení odtoku stanovit určitou konvenci. Výhodnější je dispečerský graf na obrázku 3b), z kterého je možno přímo odečíst velikost



Obr. 3 - Základní typy dispečerských grafů, vzor převzat z [7].

odtoku z nádrže v závislosti na plnění zásobního objemu a čase. [7]

Podmínky pro sestrojení dispečerského grafu:

- existence maximálně ročního cyklu řízení odtoku,
- alespoň přibližné opakování průběhu přítoku vody (zejména opakování vodného a málo vodného období)

Obecně platí, že čím pravidelnější je cyklus přítoku vody do nádrže, tím přesnější je možno dispečerský graf sestavit a tím efektivnější je řízení odtoku.

Podkladem pro sestavení je dostatečně dlouhá reprezentativní reálná průtoková řada průměrných měsíčních průtoků, nebo umělá průtoková řada.

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. Ze vztahu 3.1 je zřejmé, že jako podklad pro určení návrhového výkonu je třeba stanovit návrhový průtok, užitný (čistý) spád a znát účinnost i další vlastnosti vodního stroje, který pro daný případ přichází v úvahu.

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.

Zároveň jsou ve zmíněném vztahu zakódovány i základní principy využití vodní energie, tj. soustředování spádu a průtoků při existenci vhodného vodního stroje s nenulovou účinností. Přitom soustředěním spádu a průtoku technicky rozumíme stavbu vzdouvacích stupňů (jezů a přehrad), vytváření jezových zdrží a nádrží u přehrad, výstavbu beztlakových přivaděčů (kanálů a štol o volné hladině) i výstavbu tlakových přivaděčů (štol, šachet a tlakových potrubí).

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. Takže pokud se užitný spád určí jako průměrná hodnota za jeden měsíc, pak E odpovídá vyrobené elektrické energii za jeden měsíc, kdy hodnota t je počet hodin v jednom měsíci.[9]

4 APLIKACE

V praktické aplikaci byl vytvořen simulační model provozu vodní nádrže Mostiště za pomoci programu Microsoft Excel. Snahou bylo najít co největší možný zisk za vyrobenou elektrickou energii dosažený pomocí úpravy stávajících pravidel – dispečerského grafu. Co největšího zisku je dosaženo pomocí navržení nových pravidel řízení, které jsou sestaveny s ohledem na průběh ceny za elektrickou energii.

Pro získání těchto pravidel bylo potřeba zpracovat, již zmíněný průběh ceny za elektrickou energii na trhu. Jakým způsobem to bylo provedeno, je popsáno v kapitole 4.1.1.

Na základě zpracování vstupních dat zjednodušenou analýzou byly vytvořeny dvě skupiny tříd, které následně ovlivňují navržená pravidla řízení odtoku z nádrže. Jak byly vytvořeny skupiny tříd, se dočtete v kapitole 4.3.1.

Nově navržená pravidla řízení jsou následně otestována na vytvořeném simulačním modelu (viz kapitola 4.2) pro období let 2008 - 2016 a ověřena na simulačním modelu pro rok 2017.

4.1 POUŽITÁ VSTUPNÍ DATA

Jako první krok aplikace bylo zpracování vstupních dat, jimiž jsou časová řada průměrné denní ceny za elektrickou energii a průtoková řada denních přítoků do vodní nádrže Mostiště.

4.1.1 Cena elektrické energie

Z důvodu nekomunikativnosti provozovatele malé vodní elektrárny Energo - pro Czech, s.r.o. jsem nebyl schopen zjistit, za jakých cenových podmínek je nakládáno s vyrobenou energií, a proto jsem se obrátil na provozovatele webu <http://www.kurzy.cz>. Tato služba mimo jiné poskytuje aktuální kurzy měn, online trh s akciemi, forex obchodování, podílové fondy a vývoj cen jednotlivých komodit. Jednou z těchto komodit je právě elektřina, která nás zajímá. Na těchto stránkách je zobrazena denní, měsíční i roční průměrná cena za elektřinu. Cena je uváděna v různých měnách, ovšem hlavní měnou je euro (EUR). Přepočtení cen na české koruny byl proveden aktuálním kurzem EUR/CZK pro každý den zvlášť. Tento kurz byl převzat od České národní banky (ČNB).

Veškeré ceny elektřiny na stránkách <http://www.kurzy.cz> jsou již převzaty od jiného zdroje. Zmíněným zdrojem je komoditní burza Power Exchange Central Europe, a.s.

Cenu elektrické energie ovlivňuje několik faktorů:

- Spotové ceny:
 - Počasí a spotřeba,
 - krátkodobé a neočekávané výpadky ve výrobě,
 - sezónnost.
- Ceny futures:
 - Dlouhodobá očekávání,
 - aktuální geo-politika a ekonomická situace ve světě,
 - plánované odstávky výroby.
- Faktory při samotné kalkulaci závěrečných cen:
 - Aktuální situace na trhu (nabídka/poptávka),
 - poslední obchody,
 - situace na Německém trhu (s nímž český trh koreluje),
 - bezarbitrážní podmínky.[10][11]

Pro získání cen od energetické burzy (PXE) bych musel založit spotřebitelský účet a uhradit vstupní poplatek pro zpřístupnění potřebných dat. Z tohoto důvodu jsem se spokojil s prezentovanými cenami na webu <http://www.kurzy.cz>. Ceny byly použity jak v simulačním modelu běžného provozu nádrže, tak i v modifikovaném.

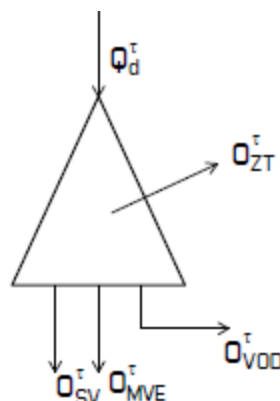
4.1.2 Průtoky

Průtoková řada vychází z dlouhodobého pozorování režimu vodního toku Oslava. Režimem vodního toku rozumíme jeho vodnost a časové rozdělení průtoku ve sledovaném profilu, jeho typický průběh, variační rozpětí, sled suchých a vlhkých roků, extrémní hodnoty průtoku, období povodní nebo naopak nízkých průtoků. Toto sledování probíhá ve vodočetných stanicích pomocí limnigrafu.

Pro sestavení simulačního modelu v této práci, který pracuje s denním krokem, bylo potřeba získat průměrné denní průtoky. Průměrné denní průtoky byly získané aritmetickým průměrem průměrných hodinových průtoků. Měření probíhalo na limnigrafu Dolní Bory nad přehradou a průtokovou řadu o délce 30ti let mi poskytl Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno.

4.2 POPIS VYTVOŘENÍ SIMULAČNÍHO MODELU

Simulační model je vytvořen pro 8 let, tj. od roku 2008 do 2016. Toto rozmezí bylo voleno z důvodu dostupnosti vstupních dat. Hodnoty denních průtoků nebyly v tomto ohledu nijak omezující, ale průměrné denní ceny za elektřinu jsou datovány pouze od roku 2008. K vytvoření simulačního modelu byl použit program Microsoft Excel. Simulační model je sestaven na základě manipulačního řádu VD Mostiště z roku 2013 a pracuje s denním krokem. Tento model izolované nádrže s jedním přítokem a třemi odtoky lze zjednodušeně schematizovat takto:



Obr. 4 - Schematizace nádrže, vzor převzat z [7].

Na obr. 4 můžeme vidět:

Q_d^τ přítok vody do nádrže v časovém kroku τ ,

Q_{VOD}^τ odběr vody na úpravnu vody v časovém kroku τ ,

Q_{MVE}^τ odtok vody z nádrže na malou vodní elektrárnu v časovém kroku τ ,

Q_{SV}^τ odtok vody z nádrže spodní výpustí (jalový odtok) v časovém kroku τ ,

Q_{ZT}^τ ztráty vody z nádrže vlivem výparu z volné hladiny v časovém kroku τ .

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

$$V_N = V_0 + \sum_{i=1}^N [Q_i - O_i(V_i)] \cdot \Delta t_i \quad (4.1)$$

Protože simulační model pracuje s denním časovým krokem, Δt tedy odpovídá časovému kroku jeden den. Pořadí hodnot v čase určuje horní index $\tau = 1, 2, \dots, N$, kde N je celkový počet řešených časových kroků (dnů). V rámci zjednodušení výpočtu nebyly uvažovány žádné ztráty, tedy $Q_{ZT}^\tau = 0$. Po aplikaci rovnice 4.1 lze tedy tento simulační model matematicky vyjádřit tímto způsobem:

$$Q_d^\tau - O_{MVE}^\tau - O_{VOD}^\tau - O_{SV}^\tau = \frac{V^\tau}{\Delta t} - \frac{V^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Pro tento vztah byly stanoveny omezující podmínky nerovnostmi:

$$\hat{O}_{MVE}^{\tau} \leq O_{MVE}^{\tau} \leq \check{O}_{MVE}^{\tau}, \quad (4.3)$$

$$\hat{V}^{\tau} \leq V^{\tau} \leq \check{V}^{\tau}, \quad (4.4)$$

kde značí:

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

\check{O}_{MVE}^{τ} maximální odtok na malou vodní elektrárnu 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 .

Před samotným vytvořením simulačního modelu bylo potřeba stanovit si počáteční a okrajovou podmínku. Počáteční podmínku zde představuje stav vody v nádrži v časovém kroku $\tau = 0$. Vychází se z plné nádrže. V čase $\tau = 0$ je tedy stav vody v nádrži na hladině $M_z = 476,90$ m n. m., který dle batygrafie nádrže odpovídá objemu $10\,385\,274$ m³. Okrajovou podmínku zde tvoří denní průměrný přítok do nádrže. Tuto hodnotu představuje první člen v rovnici 4.2, tj. Q_d^{τ} .

Velikost odtoku vody z nádrže vychází z manipulačního řádu VD Mostiště, který stanovuje hodnoty odtoku z nádrže na základě dvoustupňového dispečerského grafu. Manipulační řád říká, že veškeré odtoky z nádrže jsou přednostně odváděny přes malou vodní elektrárnu, až do výše maximální hltnosti turbíny. Tyto hodnoty představuje člen \hat{O}_{MVE}^{τ} z nerovnice 4.3 stanovující omezující podmínku zdola, určenou dispečerským grafem. Druhý omezující člen z této rovnice \check{O}_{MVE}^{τ} je určen maximální hltností turbíny.

Tab. 4 - Dvoustupňový dispečerský graf

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

Z tabulky 4 je vidět, že dispečerský graf nijak neomezuje odběry vody pro úpravnu vody Q_{VOD} bez ohledu na stav hladiny v nádrži. Ve vytvořených simulačních modelech tedy odběr pro úpravnu vody není nijak omezen. Avšak dle polohy hladiny je ovlivněn minimální odtok do toku MQ. Oba stupně dispečerského grafu byly zařazeny do simulačního modelu tak, jak popisuje manipulační řád. Vždy se tedy ověří stav hladiny k 1. dni v měsíci a na základě toho se vyvíjí velikost minimálního odtoku do toku pro celý daný měsíc. Pokud by došlo v mimořádně suchém období k rychlému poklesu hladiny v nádrži nebo docházelo při nižších hladinách ke zhoršování kvality vody, může vodohospodářský dispečink po vyhodnocení celkové situace v povodí nařídit omezení odtoků z nádrže:

- v 1. regulačním stupni na $0,290 \text{ m}^3/\text{s}$ a
- ve 2. regulačním stupni až na $\text{MQ} = 0,120 \text{ m}^3/\text{s}$. [3]

Toto snížení však není v simulačním modelu zavedeno a vychází se pouze ze základního dispečerského grafu. Následně po určení velikosti odtoku dle manipulačního řádu se vypočítá změna objemu v daném časovém kroku dle rovnice 4.2 a pomocí rozšířené funkce využívající makra se lineární interpolací na základě batygrafických čar vypočítá 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. a veškeré přebytky jsou vypuštěny přes malou vodní elektrárnu, příp. spodní výpusti.

V další části simulačního modelu následuje výpočet výkonu a vyrobené elektrické energie. Výpočet probíhá rovněž v denním kroku Δt , stejně jako odtok z nádrže. Účinnost turbíny není uvedena v dostupných podkladech, proto byla stanovena pomocí funkce „Hledání řešení“ v programu Microsoft Excel na základě garantovaných výkonů pro dané průtoky na $\eta = 0,836$. Pro zjednodušení byly zanedbány veškeré ztráty v přivaděči vody na turbínu a další ztráty, které nejsou započteny v účinnosti turbíny. Toto zjednodušení umožnilo použít pro výpočet výkonu hrubý spád, tedy pouhý rozdíl hladin (viz kap. 3.5). Hladina vody v odpadní štolě pod malou vodní elektrárnou je opět získávána pomocí lineární interpolace a její hodnota vychází z výkresové dokumentace malé vodní elektrárny na základě velikosti průtoku turbínou. Hrubý spád je určen rozdílem polohy této hladiny s polohou hladiny v nádrži. Celkový průměrný výkon je následně vypočítán pomocí rovnice 3.1. Takto vypočtený výkon je následně dle rovnice 3.2 přepočítán na vyrobenou energii za den. Výsledná hodnota je pak vynásobená cenou za elektřinu pro daný časový krok (den), čímž získáme hledaný zisk. Veškeré jednotlivé kroky výpočtu simulačního modelu uvedené výše se opakují postupně pro každý den celého období simulace.

Tab. 5 - Ukázka řízení odtoku vody z nádrže pomocí simulačního modelu

i	Rok	Měsíc	Den	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	0	0	0	0	0	0	0
	2008	1	1	476.89	10 380 090	0.54	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.06	-5 184
	2008	1	2	476.90	10 383 546	0.64	0.4	0.2	0.4	0.60	0.04	3 456
	2008	1	3	476.90	10 385 274	0.63	0.4	0.2	0.41	0.61	0.02	1 728
	2008	1	4	476.90	10 384 410	0.59	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.01	-864
	2008	1	5	476.90	10 382 682	0.58	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.02	-1 728
	2008	1	6	476.88	10 372 314	0.48	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.12	-10 368
1	2008	1	7	476.90	10 384 410	0.74	0.4	0.2	0.4	0.60	0.14	12 096
2	2008	1	8	476.90	10 385 274	0.75	0.4	0.2	0.54	0.74	0.01	864
3	2008	1	9	476.90	10 385 274	0.80	0.4	0.2	0.6	0.80	0.00	0
4	2008	1	10	476.90	10 384 410	0.59	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.01	-864
5	2008	1	11	476.90	10 385 274	0.86	0.4	0.2	0.65	0.85	0.01	864
6	2008	1	12	476.90	10 385 274	0.74	0.4	0.2	0.54	0.74	0.00	0
7	2008	1	13	476.88	10 370 586	0.43	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.17	-14 688

Tab. 6 - Ukázka výpočtu výkonu, elektrické energie a denního zisku

i	Rok	Měsíc	Den	H	O _{MVE}	H _d	H _b	Výkon	E/den	Cena/E	Zisk/den
				[m n. m.]	[m ³ /s]	[m n. m.]	[m]	[kW]	[MWh]	[Kč/MWh]	[Kč]
Plná nádrž				476.90	0	0	0	0	0.00	0.0	0.0
	2008	1	1	476.89	0.4	445.68	31.21	102.40	2.46	1 547.0	3 801.7
	2008	1	2	476.90	0.4	445.68	31.22	102.41	2.46	1 528.9	3 757.7
	2008	1	3	476.90	0.41	445.68	31.22	104.97	2.52	1 517.9	3 823.9
	2008	1	4	476.90	0.4	445.68	31.22	102.41	2.46	1 587.4	3 901.7
	2008	1	5	476.90	0.4	445.68	31.22	102.41	2.46	1 587.4	3 901.4
	2008	1	6	476.88	0.4	445.68	31.20	102.37	2.46	1 587.4	3 899.9
1	2008	1	7	476.90	0.4	445.68	31.22	102.41	2.46	1 588.0	3 903.2
2	2008	1	8	476.90	0.54	445.71	31.19	138.14	3.32	1 587.1	5 261.7
3	2008	1	9	476.90	0.6	445.72	31.18	153.43	3.68	1 598.4	5 885.7
4	2008	1	10	476.90	0.4	445.68	31.22	102.41	2.46	1 590.1	3 908.3
5	2008	1	11	476.90	0.65	445.73	31.17	166.16	3.99	1 593.5	6 354.5
6	2008	1	12	476.90	0.54	445.71	31.19	138.14	3.32	1 593.5	5 282.8
7	2008	1	13	476.88	0.4	445.68	31.20	102.36	2.46	1 593.5	3 914.5

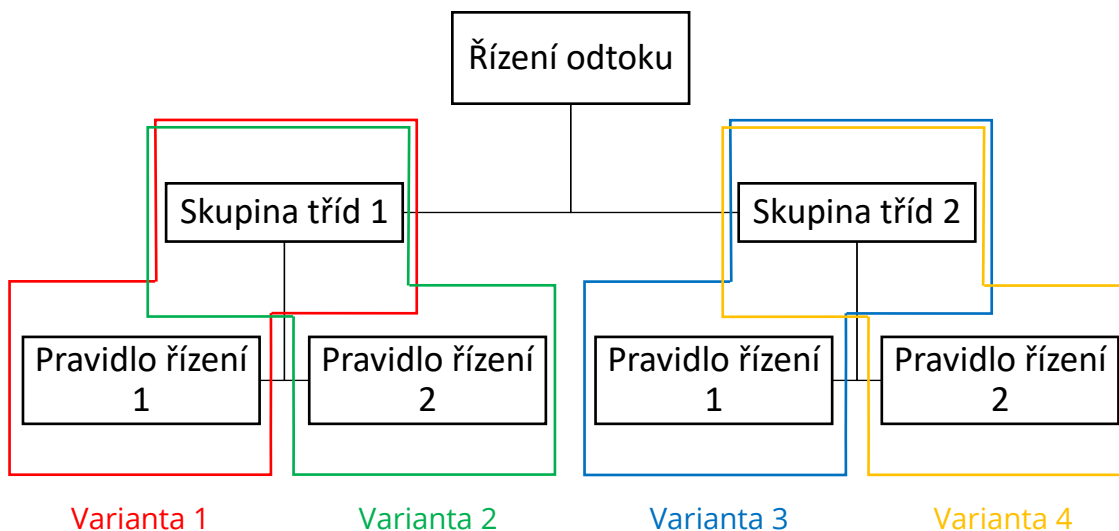
V tabulkách 5 a 6 můžete vidět ukázkou vytvořeného simulačního modelu. Každý řádek tabulky odpovídá danému časovému kroku τ . První sloupec v tabulce označuje pořadí dne, který vstupuje do hodnocení vyrobené energie a zisku. Toto hodnocení a pořadí dnů je blíže vysvětleno v kapitole 4.3.1.

4.3 VYTVOŘENÍ PRAVIDEL ŘÍZENÍ

Výše popsaný simulační model pracuje se stávajícími pravidly řízení – dispečerským grafem (viz tab. 4). Nyní popisují postup vytvoření nových pravidel řízení, které nám s ohledem na průběh vývoje ceny za elektrickou energii na trhu zajistí vyšší zisk než pravidla řízení stávající. V této kapitole jsou popsány veškeré myšlenky a postupy, které vedly k vytvoření navržených pravidel řízení.

Celkově byly navrženy 2 pravidla řízení odtoku vody z nádrže. Každé pravidlo řízení je podřízeno skupině tříd, která vychází z průměrné denní ceny elektrické energie (vyjádřené časovou řadou). Tímto je zajištěno, že odtok vody z nádrže reaguje na vývoj ceny elektrické energie na trhu v průběhu jednotlivých týdnů v roce.

V práci jsou vytvořeny dvě skupiny tříd. Vytvoření každé skupiny tříd je níže podrobněji popsáno. Vzájemná kombinace dvou pravidel řízení a dvou skupin tříd umožňuje provést simulaci provozu nádrže Mostiště ve čtyřech variantách. Pro předběžnou představu můžete vidět hierarchii problematiky na následujícím diagramu:



Obr. 5 - Diagram hierarchie problematiky

4.3.1 Skupiny tříd

Vytvoření těchto skupin je docíleno pomocí několika postupů, které vedly k zařazení jednotlivých týdnů do tří tříd označených číslicemi 1, 0 a -1. Kritériem pro zařazení do dané třídy je četnost výskytu daného týdne jako nejvíce výdělečného v daném měsíci.

Pro určení, který týden je nejvíce výdělečný, bylo nutné nejdříve roky vhodně seřadit. Jelikož každý rok začíná v jiný pracovní den, příp. víkendový den, nelze roky seřadit podle datumů, protože každý den má přiřazenou svojí jedinečnou cenu. Vývoj této ceny je ovlivněný pořadím dne v týdnu a proto bylo nutné seřadit roky dle dnů v týdnu a nikoliv dle datumů. Některé roky jsou přestupné, proto by bylo složité určit obecný postup pro všechny roky, který podchycuje veškeré aspekty. A právě z tohoto důvodu byla zavedena některá zjednodušení:

- a) Roky seřazené pod sebou jsou zkráceny o jednotlivé dny v prvním a posledním týdnu v roce, kde vznikaly nerovnosti rozložení dnů v roce.
- b) Přestupnost roku se nebere v úvahu, nýbrž se eliminuje zkrácením roku v předchozím bodě.
- c) Každý rok je rozdělený na 13 „měsíců“, z nichž každý má 4 týdny po sedmi dnech.
- d) O svátcích a víkendech, kdy se neobchoduje na trhu, nejsou vedeny ceny. A proto jsou pro tyto dny hodnoty cen za elektrickou energii stejné jako v nejbližším předchozím dni.

Princip zkrácení roků popsán v bodě a) a rozdělení dle bodu c) můžete vidět v následující tabulce.

Tab. 7 - Ukázka zkrácení roku

Rok											i	1	2	3	4	5	6	7	...	351	352	353	354	355	356	357				
	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N	...	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	
2008					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	...	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
2009								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
2010	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...	27	28	29	30	31	-	-					
2011		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...	26	27	28	29	30	31	-					
2012			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	24	25	26	27	28	29	30	31				
2013					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	...	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
2014						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
2015							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
2016	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...	26	27	28	29	30	31	-					

■ Oblast, o kterou je každý rok zkrácen a pro kterou se nenavrhují systém řízení

■ Pořadí *i-tého* dne ve vymezené oblasti

Po určení oblasti, pro kterou se budou navrhovat pravidla řízení a rozdělení roku na jednotlivé týdny (viz tab. 7), se každému dnu přiřadila cena elektřiny k jeho datu. Následně byl každý den ohodnocen vahou $A \in \langle 0, 1 \rangle$, kdy den ohodnocený vahou 0 je den s minimální cenou v daném roce a den ohodnocený vahou 1 je den s maximální cenou v daném roce. Toto ohodnocení samozřejmě proběhlo pouze na dnech ve sledované oblasti, tedy u dnů s pořadovým číslem *i*.

Z každého týdne pak byl určen aritmetický průměr vah. Pokud má tedy týden sedm dnů a každý den má přiřazenou jednu váhu, určoval se aritmetický průměr ze sedmi hodnot. Tímto způsobem byl vyhodnocen každý týden daného roku.

Tab. 8 - Ukázka přiřazení váhy, výpočet průměru vah, určení významu

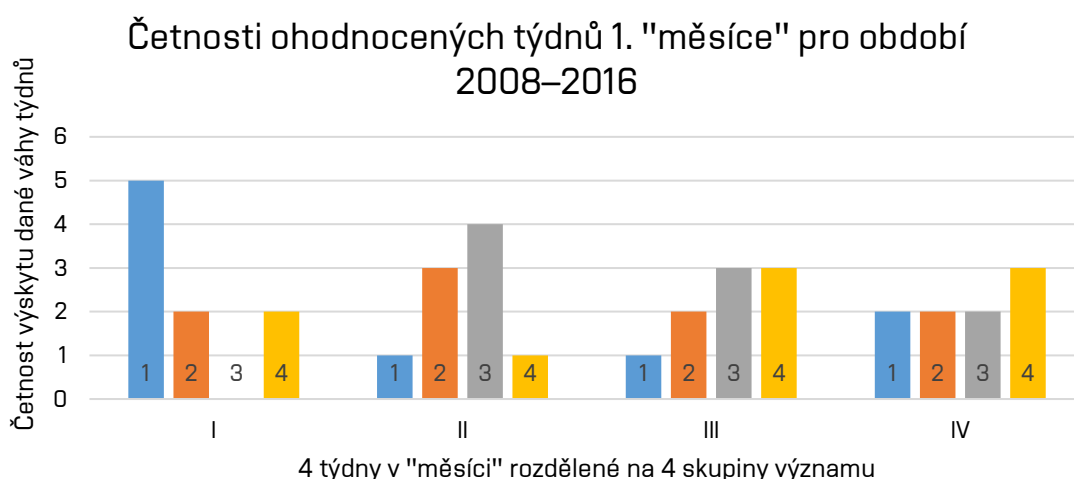
2008	Min	1.52																										
	Max	1.61																										
Týden	I							II							III							IV						
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Den	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N	P	Ú	S	Č	P	S	N
Cena	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Váha A	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4
Průměr	0.823							0.939							0.107							0.331						
Význam	2							1							4							3						

V tabulce 8 můžeme vidět výše popsané ohodnocení dnů váhami a následné zprůměrování v rámci čtyř týdnů jednoho měsíce roku 2008. Ceny jsou v tabulce uvedeny v tisících pro přehlednost a úspornost.

Poslední řádek tabulky vyjadřuje význam daného týdne z pohledu ceny za elektrickou energii. Čím vyšší průměr váhy, tím vyšší cena za elektřinu a tím je i vyšší význam tohoto týdne. Nejvýhodnější týden je ohodnocen známkou 1

a nejméně výhodný týden známkou 4. Každý „měsíc“ je vyhodnocován zvlášť, ovšem váhy jsou určovány s ohledem maximální a minimální ceny za celý rok.

Celý postup ohodnocení a vyjádření významu týdne je aplikován na každý rok ve sledovaném období let 2008–2016. Výsledkem těchto operací je histogram četností výskytu týdne ve skupinách významu. Na následujícím obrázku můžete vidět ukázkou tohoto histogramu pro první „měsíc“ řešeného období.



Obr. 6 - Četnosti ohodnocených týdnů 1. "měsíce" pro období 2008–2016

Takovéto grafické vyjádření bylo zpracováno pro každý „měsíc“ v období let 2008 až 2016, tedy pro 13 „měsíců“.

Původní myšlenkou bylo určit prioritu každého týdne subjektivně na základě grafických vyjádření. Pomocí těchto priorit by bylo určeno řízení odtoku. Z obrázku je také vidět, že by subjektivní rozdělení bylo složité až nemožné, protože rozdělení dle skupin významu není jednoznačné. A právě proto se zavedly dvě skupiny tříd, které blíže popíši v následujících kapitolách. Výsledná zatřídění jsou pak kritériem pro řízení odtoku z nádrže.

Skupina tříd 1

Tato skupina vychází z výše popsaného postupu a jako vstupní data, pro zařazení týdnů do jednotlivých tříd, používá právě četnosti ohodnocených týdnů. Její funkce je velmi prostá. Na základě četností a vah významových skupin týdne, se váženým průměrem \bar{X} tento týden ohodnotí. Díky těmto hodnotám je pak jasné, který týden v „měsíci“ má vyšší, či nižší význam oproti ostatním.

V prvním odstavci kapitoly 4.3.1 jsem zmiňoval zatřídění do třech tříd (1, 0, -1). Tyto tři třídy slouží jako kritérium, podle kterého se pak řídí odtok z nádrže navrženým pravidlem řízení. Zatřídění do tříd se provedlo pomocí zvolení intervalů s takovým rozsahem, aby byl rovnoměrně pokryt rozsah ohodnocení

týdnů váženým průměrem. Každá třída má svůj jedinečný interval, získaný pomocí těchto rovnic:

$$\text{MIN}_m = \min \{ \bar{X}_I; \bar{X}_{II}; \bar{X}_{III}; \bar{X}_{IV} \}, \quad (4.5)$$

$$\text{MAX}_m = \max \{ \bar{X}_I; \bar{X}_{II}; \bar{X}_{III}; \bar{X}_{IV} \}, \quad (4.6)$$

$$\text{PRŮM}^- = \frac{1}{4} [\sum_{j=I}^{IV} \bar{X}_{j,m} - (\text{MAX}_m - \text{MIN}_m)], \quad (4.7)$$

$$\text{PRŮM}^+ = \frac{1}{4} [\sum_{j=I}^{IV} \bar{X}_{j,m} + (\text{MAX}_m - \text{MIN}_m)], \quad (4.8)$$

kde index m označuje pořadí daného měsíce v roce a index j pořadí týdne v měsíci. MIN_m a MAX_m jsou minimální a maximální hodnota z vážených průměrů, jimiž jsou ohodnoceny týdny (I, II, III, IV) v měsíci.

Po aplikaci rovnic 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8 získáváme tedy tento rozsah intervalů pro každý měsíc ve sledovaném období (tj. 2008–2016):

TŘÍDA	INTERVAL
1	$\langle \text{MIN}_m, \text{PRŮM}^- \rangle$,
0	$\langle \text{PRŮM}^-, \text{PRŮM}^+ \rangle$,
-1	$\langle \text{PRŮM}^+, \text{MAX}_m \rangle$.

Tab. 9 - Ukázka zatřídění týdnů prvních čtyř "měsíců" v systému tříd 1

m		1				2				3				4			
Týden		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Význam	1	5	1	1	2	3	2	3	1	5	0	0	4	3	1	1	4
	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3	3	1	1	2	4	2
	3	0	4	3	2	1	2	4	2	1	3	5	0	0	5	3	1
	4	2	1	3	3	3	3	0	3	1	3	1	4	5	1	1	2
Vážený průměr		1.9	2.6	2.9	2.7	2.4	2.7	2.1	2.8	1.8	3.0	2.8	2.4	2.8	2.7	2.4	2.1

Stanovení intervalů:

MIN	1.9	2.1	1.8	2.1
PRŮM-	2.3	2.3	2.2	2.3
PRŮM+	2.8	2.7	2.8	2.7
MAX	2.9	2.8	3.0	2.8

Zatřídění:

MIN _m - PRŮM ⁻	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
PRŮM ⁻ - PRŮM ⁺	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
PRŮM ⁺ - MAX _m	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Třídy	1	0	-1	0	0	0	1	-1	1	-1	0	0	-1	0	0	0	1
-------	---	---	----	---	---	---	---	----	---	----	---	---	----	---	---	---	---

V tabulce 9 je vidět celý postup aplikace skupiny tříd 1 popsany výše. V první části tabulky lze pozorovat ohodnocení jednotlivých týdnů váženým průměrem. Pomocí barevné škály je zvýrazněná priorita daného týdne v „měsíci“, kde rudá barva odpovídá nejméně výhodnému týdnu a sytě zelená nejvýhodnějšímu týdnu. Pro přehlednost jsou liché „měsíce“ podbarveny světle šedou barvou.

V druhé části tabulky jsou pak provedeny výpočty intervalů podle rovnic 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8 pro zatřídění. Liché měsíce jsou opět podbarveny světle šedou barvou.

Třetí část zvýrazňuje samotné zatřídění týdne do jednotlivých intervalů. Zda vážený průměr daného dne spadá do intervalu, pak je hodnota v buňce 1. Pokud do něj nespadá, hodnota je 0. Tímto způsobem jsou zatříděny veškeré týdny v roce. Toto rozřídění je následně shrnuto v posledním řádku tabulky „Třídy“, kde jsou třídy pro přehlednost zvýrazněny barevnou škálou.

Skupina tříd 2

Tato skupina tříd je velmi podobná předešlé. Vychází ze stejných vstupních dat, taktéž ohodnocuje týdny váženým průměrem \bar{X} a následně je roztrídí na základě významu do tří tříd. Každá třída má opět svůj jedinečný interval pro zařazení. Zde se již *skupina tříd 2* liší od předešlé skupiny. Intervaly pro zařazení jsou určeny dle těchto rovnic:

$$\text{MIN} = \min \{ \bar{X} \}, \quad (4.9)$$

$$\text{MAX} = \max \{ \bar{X} \}, \quad (4.10)$$

$$\text{PRŮM}^- = \frac{1}{n} \sum \bar{X} - \frac{1}{10} (\text{MAX} - \text{MIN}), \quad (4.11)$$

$$\text{PRŮM}^+ = \frac{1}{n} \sum \bar{X} + \frac{1}{10} (\text{MAX} - \text{MIN}), \quad (4.12)$$

kde n označuje celkový počet týdnů v roce. MIN a MAX jsou minimální a maximální hodnota z vážených průměrů, jimiž jsou ohodnoceny týdny v roce. Po aplikaci rovnic 4.9, 4.10, 4.11 a 4.12 vzniknou tyto intervaly pro zatřídění do tříd 1, 0 a -1:

TŘÍDA	INTERVAL
1	$\langle \text{MIN}, \text{PRŮM}^- \rangle,$
0	$\langle \text{PRŮM}^-, \text{PRŮM}^+ \rangle,$
-1	$\langle \text{PRŮM}^+, \text{MAX} \rangle.$

Tab. 10 - Ukázka zatřídění týdnů prvních čtyř "měsíců" v systému tříd 2

m		1				2				3				4			
Týden		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Význam	1	5	1	1	2	3	2	3	1	5	0	0	4	3	1	1	4
	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3	3	1	1	2	4	2
	3	0	4	3	2	1	2	4	2	1	3	5	0	0	5	3	1
	4	2	1	3	3	3	3	0	3	1	3	1	4	5	1	1	2
Vážený průměr		1.9	2.6	2.9	2.7	2.4	2.7	2.1	2.8	1.8	3.0	2.8	2.4	2.8	2.7	2.4	2.1

Stanovení intervalů:

MIN	1.8
PRŮM-	2.8
PRŮM+	2.2
MAX	3.0

Zatřídění:

MIN _m - PRŮM ⁻	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
PRŮM ⁻ - PRŮM ⁺	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
PRŮM ⁺ - MAX _m	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0

Třídy	1	0	-1	-1	0	-1	1	-1	1	-1	-1	0	-1	-1	0	1
-------	---	---	----	----	---	----	---	----	---	----	----	---	----	----	---	---

V tabulce 10 je znázorněn celý postup zatřídění. V první části je vidět, stejně jako u předchozí skupiny tříd, ohodnocení jednotlivých týdnů váženým průměrem. Priorita týdne je opět vyznačena barevnou škálou, kde rudá označuje nejméně významný týden a sytě zelená nejvýznamnější týden. Dle této barevné škály lze také pozorovat odlišnost oproti předchozímu systému, kde byl rudou barvou označen vždy jeden týden v „měsíci“, ale zde je označen pouze jeden týden v roce. Stejně tak tomu je i s týdnem označeným sytě zelenou barvou, tedy s nejvýznamnějším týdnem.

V další části tabulky je proveden výpočet intervalů dle rovnic 4.9, 4.10, 4.11 a 4.12. Tyto intervaly vychází z hodnot vážených průměrů všech týdnů v roce. Šedé podbarvení sloupečků v horní i této části tabulky označuje liché měsíce.

V poslední části je opět vyjádřeno finální zatřídění do jednotlivých tříd podle vypočtených intervalů z předchozího kroku. Na posledním řádku tabulky „Třídy“ je shrnuto zatřídění jednotlivých týdnů do tříd 1, 0 a -1. Pro přehlednost je tento řádek zvýrazněn barevnou škálou, vyznačující jednotlivé třídy.

Z tabulky lze také pozorovat, že se výsledné zatřídění liší od zatřídění skupiny tříd 1 větším výskytem kategorie -1.

4.3.2 Pravidla řízení

Pravidla řízení odtoku vody z nádrže určují jakým způsobem, za jakých podmínek a jak velké množství vody má být v daném časovém kroku vypuštěno. V této kapitole jsou popsána dvě navržená pravidla řízení.

Tato pravidla řízení jsou aplikována pouze na v období časových kroků, které spadají do týdnů zařazených do jednotlivých tříd (viz výše). Funkčnost těchto pravidel je otestována na simulačním modelu vytvořeném pro období let 2008 až 2016 a následně je jejich vhodnost ověřena na nezávislém simulačním modelu vytvořeném pro rok 2017.

Činnost těchto pravidel probíhá pouze v týdnech zařazených do třídy 1. Ve zbylých třídách probíhá řízení odtoku podle stávajících pravidel řízení – dispečerského grafu. Celá problematika je blíže popsána v následujících podkapitolách.

Vhodnost řízení podle navržených pravidel je vyjádřena porovnáním celkového zisku a celkové vyrobené energie vypočtené ze simulačního modelu, který pracuje na základě stávajících pravidel řízení a ze simulačního modelu pracujícího s navrženými pravidly řízení. Výsledky a porovnání bude vyobrazeno a popsáno v kapitole 5.

Pravidlo řízení 1

Pravidlo řízení 1 je navrženo tak, aby bylo co nejjednodušší. Právě proto spočívá pouze v úpravě stávajícího pravidla řízení – dispečerského grafu. Tato úprava se dotýká hodnot minimálních odtoků z nádrže a eliminace druhého stupně řízení na základě hladiny v nádrži. Na minimálních hodnotách odtoku se projevuje tak, že jsou za určitého kritéria navýšeny. Kritériem je v tomto případě třída, do které je daný časový krok zatříděn.

Jak bylo popsáno výše, tyto třídy jsou tři (1, 0 a -1) a vztahují se vždy na celé týdny, tzn. každých sedm po sobě jdoucích časových kroků, tedy dní, podléhá stejnému navýšení odtoku z nádrže. Podle těchto kritérií je pak ovlivněn odtok z nádrže tímto způsobem:

TŘÍDA	VELIKOST ODTOKU
1	navýšená hodnota,
0	hodnota z 1. stupně d. g., tj. 0,4 m ³ /s,
-1	hodnota z 2. stupně d. g., tj. 0,29 m ³ /s.

U *pravidla řízení 1* se nehledí na stav hladiny v nádrži. Odtok je řízen na základě zatřídění daného týdne. Pošetření vody v nádrži se tedy neprovádí dle polohy hladiny na začátku měsíce (jak stanovuje stávající pravidlo – dispečerský graf), ale probíhá průběžně v celém období v každém týdnu, který je zařazen do třídy - 1, příp. třídy 0.

Tab. 11 - Ukázka pravidla řízení 1

i	Rok	Měsíc	Den	H	V	Q _d	O _{MŘ}	O _{vod}	O _{MVE}	O _{celk}	Q _d - O _{celk}	ΔV	Třída
				[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]	-
1	2008	1	7	476.79	10 289 370	0.74	1.5	0.2	1.5	1.70	-0.96	-82 944	1
2	2008	1	8	476.69	10 207 290	0.75	1.5	0.2	1.5	1.70	-0.95	-82 080	1
3	2008	1	9	476.60	10 129 530	0.8	1.5	0.2	1.5	1.70	-0.90	-77 760	1
4	2008	1	10	476.48	10 033 626	0.59	1.5	0.2	1.5	1.70	-1.11	-95 904	1
5	2008	1	11	476.40	9 961 050	0.86	1.5	0.2	1.5	1.70	-0.84	-72 576	1
6	2008	1	12	476.30	9 878 106	0.74	1.5	0.2	1.5	1.70	-0.96	-82 944	1
7	2008	1	13	476.16	9 768 378	0.43	1.5	0.2	1.5	1.70	-1.27	-109 728	1
8	2008	1	14	476.16	9 770 970	0.63	0.4	0.2	0.4	0.60	0.03	2 592	0
9	2008	1	15	476.16	9 767 514	0.56	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.04	-3 456	0
10	2008	1	16	476.16	9 764 058	0.56	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.04	-3 456	0
11	2008	1	17	476.16	9 769 242	0.66	0.4	0.2	0.4	0.60	0.06	5 184	0
12	2008	1	18	476.19	9 790 842	0.85	0.4	0.2	0.4	0.60	0.25	21 600	0
13	2008	1	19	476.23	9 827 994	1.03	0.4	0.2	0.4	0.60	0.43	37 152	0
14	2008	1	20	476.60	10 130 394	4.1	0.4	0.2	0.4	0.60	3.50	302 400	0
15	2008	1	21	476.88	10 368 858	3.25	0.29	0.2	0.29	0.49	2.76	238 464	-1
16	2008	1	22	476.90	10 385 274	3.08	0.29	0.2	1.5	2.89	0.19	16 416	-1
17	2008	1	23	476.90	10 385 274	2.9	0.29	0.2	1.5	2.90	0.00	0	-1
18	2008	1	24	476.90	10 385 274	1.67	0.29	0.2	1.47	1.67	0.00	0	-1
19	2008	1	25	476.90	10 385 274	1.7	0.29	0.2	1.5	1.70	0.00	0	-1
20	2008	1	26	476.90	10 385 274	1.7	0.29	0.2	1.5	1.70	0.00	0	-1
21	2008	1	27	476.90	10 385 274	1.52	0.29	0.2	1.32	1.52	0.00	0	-1

V tab. 11 můžete vidět ukázkou použití *pravidla řízení 1* na simulačním modelu. Jsou zde vyobrazeny tři po sobě jdoucí týdny v roce 2008. Jak bylo popsáno výše, každých sedm po sobě jdoucích časových kroků (dní) má zařazení do stejné třídy. Na základě této třídy je pak ovlivněn sloupeček s názvem O_{MŘ}, který je podbarven oranžovou barvou. V tomto sloupečku je krásně vidět rozdíl v minimálních odtocích na základě zatřídění daného týdne.

V této ukázce byla pro třídu 1 zvolena minimální hodnota odtoku na 1,5 m³/s, což odpovídá plné hltnosti turbíny. Jde o velké průtočné množství vody. V prvním týdnu lze tedy pozorovat velký úbytek vody ve sloupečku ΔV.

V následujícím týdnu, který je zařazen do třídy 0, odpovídá minimální hodnota odtoku 1. stupni řízení dispečerským grafem, tj. 0,4 m³/s. Zde z důvodu nízkých přítoků dochází k malým změnám v objemu. Ovšem v posledním dni (*i* = 14) druhého týdne vidíme nárůst přítoku a díky omezenému odtoku dochází k plnění nádrže.

Třetí týden je zařazen ve třídě -1, to znamená, že minimální hodnota odtoku odpovídá hodnotě 2. stupně dispečerského grafu. Díky této skutečnosti dochází ještě k většímu pošetření vody a to lze vidět hned v prvním dni tohoto týdne ($i = 15$), kdy se nám nádrž téměř naplní. K úplnému naplnění na kótu hladiny $M_z = 476,90$ m n. m. dojde následující den ($i = 16$).

Navzdory tomu, že je týden zařazený ve třídě -1, který způsobuje pošetření vody, máme v tomto období velké přítoky. Ze simulačního modelu jde vidět, že hodnota celkového odtoku v tomto týdnu je $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, což je hodnota odpovídající plné hltnosti turbíny. Z toho plyne, že způsob řízení se opravdu dotýká pouze minimálních hodnot odtoku z nádrže. Když máme dostatek vody, nic nám nebrání pustit na turbínu nadbytečné množství vody.

Pravidlo řízení 2

Toto pravidlo je trochu komplikovanější oproti předchozímu. Není však příliš složité. V podstatě jde jen o to, že si určíme výchozí hladinu v nádrži a k ní limitní hladinu, která je nižší. Z batygrafických čar pak zjistíme velikost objemu vody v nádrži pro každou z těchto hladin. Rozdíl mezi těmito objemy je pak dostupný objem vody, který můžeme vypustit během sedmi dní v týdnu. Pravidlo neurčuje absolutní velikost odtoku z nádrže, ale stejně jako *pravidlo řízení 1* upravuje minimální hodnotu odtoku dispečerského grafu.

Odtok vody z nádrže pomocí toho pravidla probíhá pouze v týdnech zařazených do třídy 1 (na základě skupin tříd popsaných výše). Průtočné množství vypuštěné vody v těchto týdnech je spočítáno na základě rovnic:

$$V_D = V - V_{H_{lim}} \quad (4.13)$$

$$O_{M\check{R}} = \frac{V_D}{(7 - n) \cdot \Delta t} \quad (4.14)$$

Rovnice 4.13 slouží k výpočtu dostupného objemu vody V_D , který můžeme během týdne vypustit z nádrže. Jak bylo výše zmíněno, jedná se o rozdíl objemů výchozí hladiny V , tj. objem vody v nádrži odpovídající hladině na začátku každého časového kroku (tedy hladina vody v nádrži na konci předchozího dne) a hladiny limitní $V_{H_{lim}}$, stanovené subjektivně. Z dostupného objemu V_D v daném kroku pak vychází výpočet hodnoty minimálního odtoku z nádrže $O_{M\check{R}}$ pomocí rovnice 4.14. Tato rovnice je aplikována postupně v každém časovém kroku a v rámci jednotlivých týdnů se opakuje. Výpočet je jedinečný pro každý den v týdnu právě díky proměnné n , která značí počet předešlých dní v daném týdnu. Pro představu, pokud bude výpočet prováděn ve třetím dni, pak bude velikost $n = 2$. Pokud se bude jednat o poslední den v týdnu (počet předešlých dnů je 6 a díky tomu

je výsledek závorky roven 1), jmenovatel bude vyjádřen pouze délkou časového kroku Δt .

Aby bylo možné tento výpočet aplikovat, je důležité splnit podmínku nerovnosti hladin:

$$H_{lim} < H_h \quad (4.15)$$

Pokud by tato podmínka splněna nebyla, pravidlo bude, v případě zařazení týdne do třídy 1, nečinné. Jestliže se hladina v nádrži nachází pod kótou stanovené limitní hladiny, výše popsany výpočet dle rovnic 4.13 a 4.13 se neprovede a hodnota minimálního odtoku z nádrže je pak nastavena hodnotu odpovídající druhému stupni řízení dle stávajícího dispečerského grafu, tj. 0,29 m³/s.

V případě zařazení týdne do kategorií 0 a -1 se pravidlo chová shodně, jako *pravidlo řízení 1*. Takže pokud to shrneme, na základě zatřídění týdne se pravidlo chová takto:

TŘÍDA	VELIKOST ODTOKU
1	rozpočet V_D dle rovnic 4.13 a 4.14,
0	hodnota z 1. stupně d. g., tj. 0,4 m ³ /s,
-1	hodnota z 2. stupně d. g., tj. 0,29 m ³ /s.

Tab. 12 - Ukázka pravidla řízení 2

i	Rok	Měsíc	Den	H	V	Q _d	OMŘ	O _{vod}	OMVE	O _{celk}	Q _d -O _{celk}	ΔV	Třída
				[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]	-
323	2015	11	23	459.36	1 216 028	0.81	0.4	0.2	0.4	0.60	0.21	18 144	0
324	2015	11	24	459.35	1 212 572	0.56	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.04	-3 456	0
325	2015	11	25	459.24	1 187 516	0.31	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.29	-25 056	0
326	2015	11	26	459.13	1 162 460	0.31	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.29	-25 056	0
327	2015	11	27	459.03	1 139 132	0.33	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.27	-23 328	0
328	2015	11	28	458.93	1 116 668	0.34	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.26	-22 464	0
329	2015	11	29	458.81	1 092 476	0.32	0.4	0.2	0.4	0.60	-0.28	-24 192	0
330	2015	11	30	458.75	1 077 788	0.32	0.29	0.2	0.29	0.49	-0.17	-14 688	-1
331	2015	12	1	458.99	1 129 628	1.09	0.29	0.2	0.29	0.49	0.60	51 840	-1
332	2015	12	2	459.75	1 309 340	2.57	0.29	0.2	0.29	0.49	2.08	179 712	-1
333	2015	12	3	460.29	1 445 852	2.07	0.29	0.2	0.29	0.49	1.58	136 512	-1
334	2015	12	4	460.64	1 538 300	1.56	0.29	0.2	0.29	0.49	1.07	92 448	-1
335	2015	12	5	460.95	1 623 836	1.48	0.29	0.2	0.29	0.49	0.99	85 536	-1
336	2015	12	6	461.17	1 686 908	1.22	0.29	0.2	0.29	0.49	0.73	63 072	-1
337	2015	12	7	461.05	1 651 464	0.85	1.06	0.2	1.06	1.26	-0.41	-35 444	1
338	2015	12	8	460.86	1 599 748	0.77	1.17	0.2	1.17	1.37	-0.60	-51 716	1
339	2015	12	9	460.61	1 529 542	0.67	1.28	0.2	1.28	1.48	-0.81	-70 206	1
340	2015	12	10	460.24	1 433 632	0.49	1.40	0.2	1.40	1.60	-1.11	-95 910	1
341	2015	12	11	459.86	1 337 146	0.58	1.5	0.2	1.50	1.70	-1.12	-96 486	1
342	2015	12	12	459.44	1 233 466	0.5	1.5	0.2	1.5	1.70	-1.20	-103 680	1
343	2015	12	13	459.02	1 137 562	0.59	1.5	0.2	1.5	1.70	-1.11	-95 904	1

V tab. 12 je ukázka části simulačního modelu provozu nádrže s použitím *pravidla řízení 2*. V tabulce je opět vyznačeno barevnou škálou zařazení týdnů do jednotlivých tříd. Na základě tohoto zařazení je ovlivněna minimální hodnota odtoku z nádrže (sloupeček O_{MR} podbarvený oranžovou barvou). V této části simulačního modelu je zrovna období nízkých přítoků do nádrže a tak lze hezky pozorovat ovlivněný celkový odtok z nádrže O_{celk} na základě zatřídění týdne. V této ukázce simulačního modelu pracuje *pravidlo řízení 2* na základě těchto podmínek řízení:

Tab. 13 - Podmínky řízení

H_{lim}	458.60	m n. m.
H_{max}	476.90	m n. m.
V_{Hlim}	1 045 678	m n. m.

Z tab. 13 je patrné, že jako limitní hladina byla zvolena hladina stálého nadržení, tedy nejnižší hladina, po kterou lze nádrž vypustit.

Ve sloupečku O_{MR} v tab. 12 je jasně vidět, že minimální hodnota odtoku vody z nádrže pro týdny ve třídách 0 a -1 odpovídají hodnotám stanoveným stávajícími pravidly řízení odtoku a pro třídu 1 vypočteným dle navrženého *pravidla řízení 2*. Hodnoty v tomto sloupečku nabývají maximálně $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, protože tato hodnota odpovídá maximální hltnosti turbíny. V týdnu zařazeném ve třídě 1 lze pozorovat různou hodnotu O_{MR} pro každý den, což je způsobeno výpočtem dle rovnice 4.14, kdy je jmenovatel ovlivněn pořadím dne v daném týdnu.

5 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ

Navržená pravidla řízení odtoku vody z nádrže jsou testována na simulačním modelu vytvořeným pro období let 2008–2016 v denním kroku. Jelikož skupiny tříd vycházejí ze zpracování vývoje ceny elektrické energie za stejné období, jsou výsledky pravidel řízení také ověřeny na simulačním modelu pro rok 2017, rovněž s denním časovým krokem.

Hodnoty výsledků neodpovídají skutečným absolutním hodnotám, protože v celé problematice jsou zavedena zjednodušení. Těmito zjednodušeními rozumíme např. zanedbání ztrát výparem z volné hladiny, nezapočítané proplachy výpustí, zanedbání ztrát na nátoky vody do turbíny v MVE a aplikování navržených pravidel pouze na určité období v roce (viz kap. 4.3.1). Výsledky navržených pravidel řízení jsou však porovnávány s výsledky stávajících pravidel, u kterých jsou uvedena zjednodušení taktéž zavedena. V tomto případě pak hodnoty neodpovídají skutečnosti, avšak rozdíl mezi nimi je relevantní.

V práci byla navržena dvě pravidla tříd, kterým je nadřazena skupina tříd. Skupiny tříd mám dvě. Tedy vzájemná kombinace dává 4 varianty řízení.

5.1 VARIANTA 1

Jak bylo zobrazeno v obr. 5, *varianta 1* je kombinace *skupiny tříd 1* a *pravidlem řízení 1*. To znamená, že pro tuto variantu byla použita skupina tříd, vycházející z významu týdnů v rámci měsíce. *Pravidlo řízení 1* spočívá v navyšování minimální hodnoty odtoku z nádrže.

Výsledků z této varianty bylo dosaženo pomocí vytvořeného simulačního modelu pro období let 2008 až 2016 s denním krokem. Vycházelo se s plně nádrže, tedy z hladiny zásobního prostoru $M_z = 476,90$ m n. m. Navyšování hodnoty minimálního odtoku bylo prováděno subjektivně s krokem $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ až do okamžiku vzniku poruchy. Poruchou zde rozumíme zásah do prostoru stálého nadržení, tzn. že se poloha hladiny v nádrži dostala pod kótu hladiny stálého nadržení $M_s = 458,60$ m n. m.

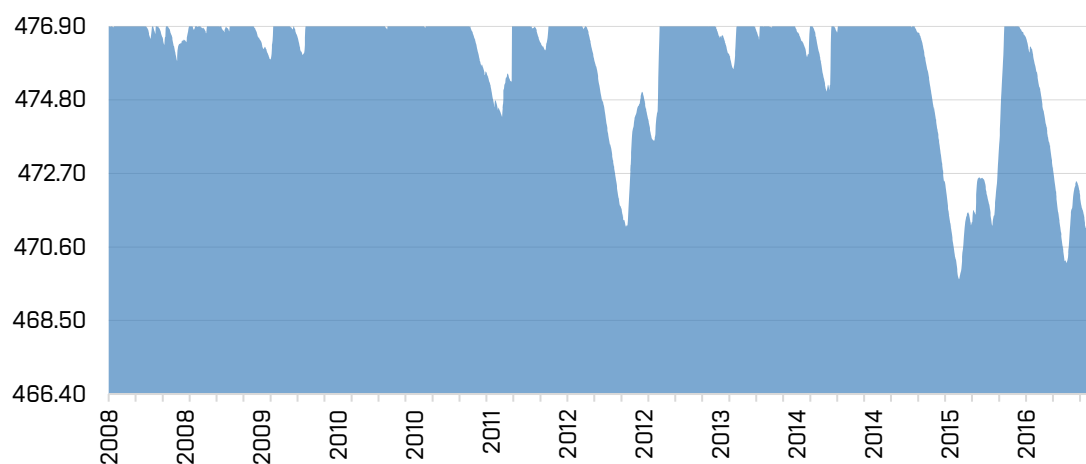
Po provedení simulace ve sledovaném období při daném pravidlu řízení odtoku byl vyhodnocen celkový zisk za vyrobenou energii, objem vyrobené energie, minimální hladina dosažená v simulovaném období a hladina na konci simulovaného období. Výsledky jsou pak porovnány s výsledky dosaženými pomocí stávajících pravidel řízení – dispečerský graf. Řízení dle stávajících pravidel dosahovalo těchto výsledků:

Tab. 14 - Výsledky simulace dle stávajících pravidel řízení, 2008–2016

O [m ³ /s]	H _{min}	H ₂₀₁₆	Poruchy	Zisk [Kč]	Energie [MWh]
dle D.G.	469.68	470.33	Ne	18 050 084	15 888.7

Z tab. 14 můžete vidět, že celkový zisk za období let 2008–2016 činí přes 18 mil. Kč. Vyrobená energie v tomto období dosahovala téměř 16 tis. MWh. Těchto hodnot bylo dosaženo dle stávajících pravidel řízení odtoku vody z nádrže. V průběhu simulace ve sledovaném období a dle zmíněných pravidel řízení bylo dosaženo minimální hladiny v nádrži 469,68 m n. m., a jelikož jsme se nedostali pod hladinu stálého nadržení, nevznikly nám žádné poruchy. Na konci simulovaného období jsme se dostali na kótu hladiny 470,33 m n. m.

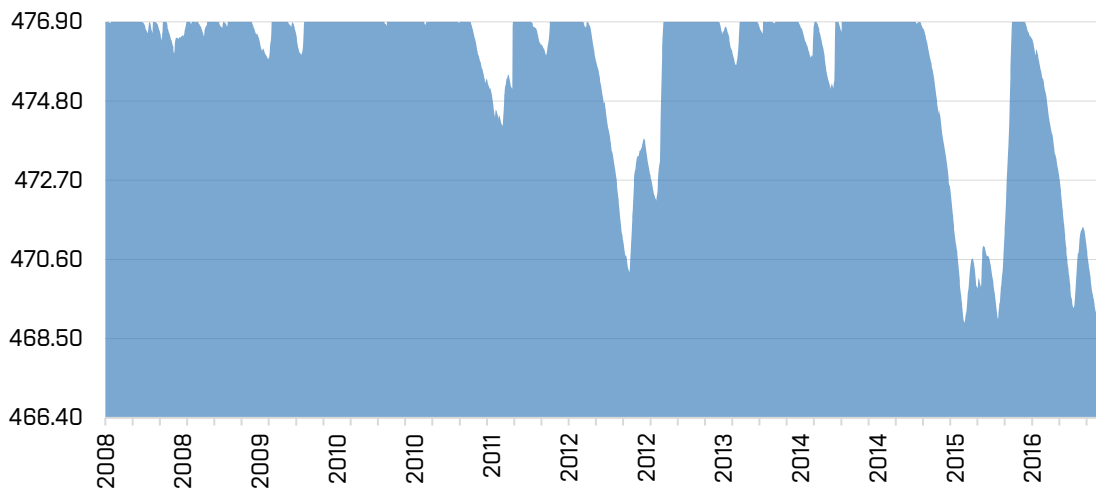
Průběh hladiny v nádrži, 2008–2016



Obr. 7 - Průběh hladiny během simulace provozu v období 2008–2016

Z obr. 7 lze vyvodit, že dle stávajících pravidel řízení se nádrž zvládá doplňovat na hladinu $M_z = 476,90$ m n. m. Výjimkou jsou však roky 2015 a 2016, které jsou označeny jako velmi suché roky. V úseku těchto dvou let lze také pozorovat velký úbytek vody z nádrže. Po aplikování *pravidla řízení 1* na tento simulační model vypadal průběh hladiny vody v nádrži takto:

Varianta 1, průběh hladiny v nádrži při $O = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016



Obr. 8 – Varianta 1, průběh hladiny v nádrži při $O = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016

Na obr. 8 je vyobrazen průběh hladiny při aplikaci *pravidla řízení 1*, konkrétně zvednutí hodnoty minimálního odtoku na $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ v týdnech zařazených do třídy 1 (viz kap. 4.3.2). Lze pozorovat, že se nádrž rovněž stíhá naplnit. Výjimkou jsou však opět suché roky 2015 a 2016, kdy dojde k výraznějšímu poklesu hladiny. Při tomto řízení se minimální kóta polohy hladiny v nádrži ocitla na hodnotě 468,38 m n. m. Již zde lze vidět rozdíl oproti stávajícímu pravidlu řízení. Minimální dosažená hladina v nádrži je o 1,30 m níže. V tomto období se díky navýšenému odtoku také povedlo zvýšit zisk, přesněji o cca 105 tis. Kč. Byl zde pozorovatelný i nárůst vyrobené energie. Při použití *pravidla řízení 1* s velikostí odtoku $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro dané týdny se vyrobilo o 100 MWh více.

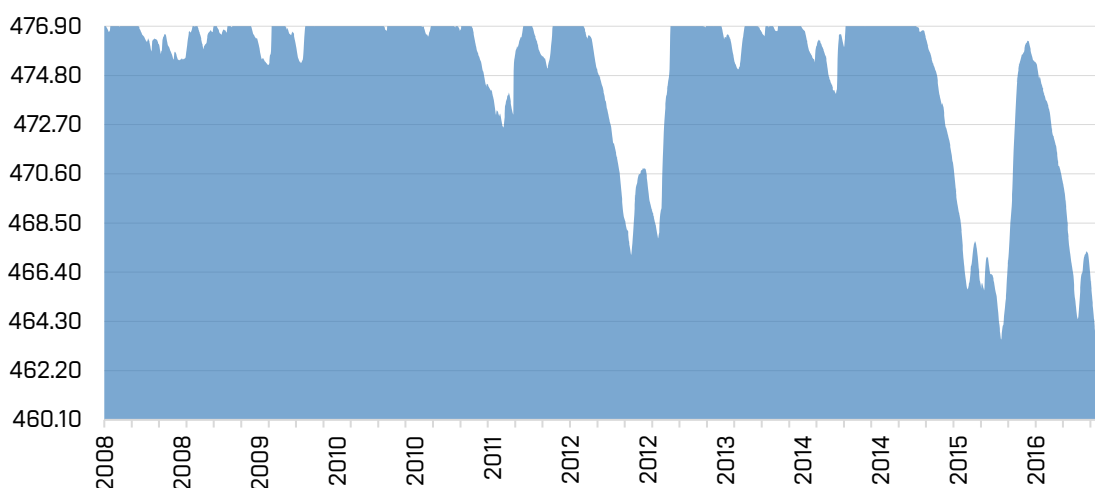
Dalším navyšováním minimálních hodnot odtoku z nádrže a provádění simulace provozu nádrže při navrženém pravidlu řízení, jsme získali tyto výsledky:

Tab. 15 – Varianta 1, výsledky simulace provozu pro období 2008 – 2016

O [m^3/s]	H _{min}	H ₂₀₁₆	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D.G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D.G. [MWh]
0.5	468.38	468.42	Ne	18 154 732	104 699	15 989	100
0.6	466.67	466.72	Ne	18 232 925	182 891	16 049	160
0.7	464.72	464.78	Ne	18 303 729	253 696	16 091	203
0.8	460.68	460.76	Ne	18 387 852	337 819	16 155	267
0.9	-	-	Ano	-	-	-	-

Z tab. 15 vidíme, že čím více jsme navýšili odtok, tím větší byl pokles hladiny na konci simulovaného období. Při hodnotě odtoku $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ se hladina v nádrži dostala do prostoru stálého nadržení, čímž nám vznikla porucha, kterou při tomto řízení nepřipouštíme. Proto touto hodnotou navyšování končí. Průběh hladiny při nejvyšším možným odtoku $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ vypadá takto:

Varianta 1, průběh hladiny v nádrži při $O = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016



Obr. 9 - Varianta 1, průběh hladiny během simulace při $O = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016

Z tohoto obrázku lze pozorovat, že ke kritickému vyprázdnění došlo až v roce 2016, který byl extrémně suchý. Toto pravidlo bohužel nepracuje s predikcí velikosti přítoku do nádrže, takže je v suchém roce bezohledné k množství vody v nádrži.

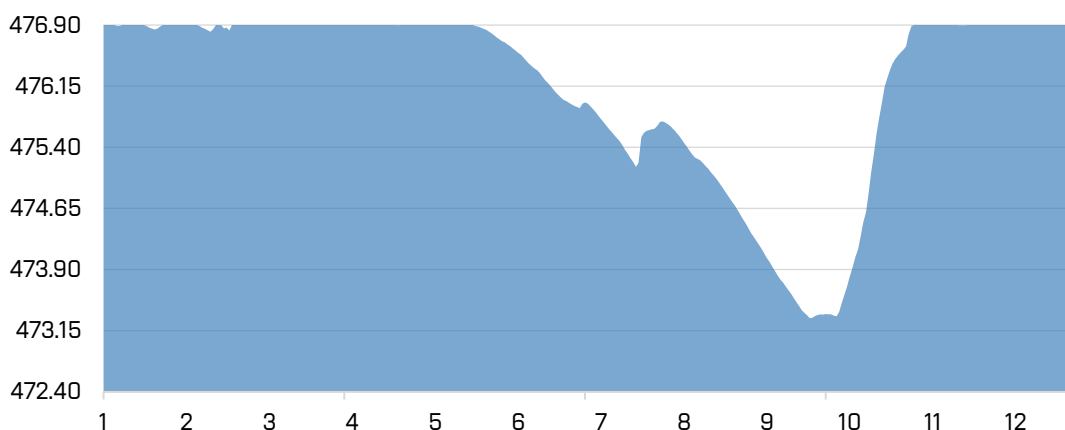
Protože skupiny tříd vycházejí z vývoje cen právě v období let 2008–2016, mohlo by dojít k ovlivnění výsledků při testování na simulačním modelu vytvořeném pro stejné období. Proto se pravidlo řízení aplikovalo i na simulační model s denním krokem pro rok 2017. Pro porovnání se vyhodnotili výsledky i ze simulačního modelu pro rok 2017 při použití stávajících pravidel řízení.

Tab. 16 - Výsledky simulace provozu dle stávajících pravidel řízení, 2017

$O \text{ [m}^3/\text{s]}$	H_{\min}	H_{2017}	Poruchy	Zisk [Kč]	Energie [MWh]
dle D.G.	473.31	476.90	Ne	1 162 678	1 356.6

Simulační model pro rok 2017 vychází, rovněž jako simulační model pro období let 2008–2016, z plné nádrže (výchozí hladina je $M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$). Z tab. 16 je patrné, že na konci roku 2017 se nám nádrž, při stávajících pravidlech řízení, opět naplní. Také lze vidět, že nejvyšší pokles hladiny v roce činil cca 3,6 m. Průběh hladiny během celé simulace provozu při použití stávajících pravidel řízení lze vidět na následujícím obrázku.

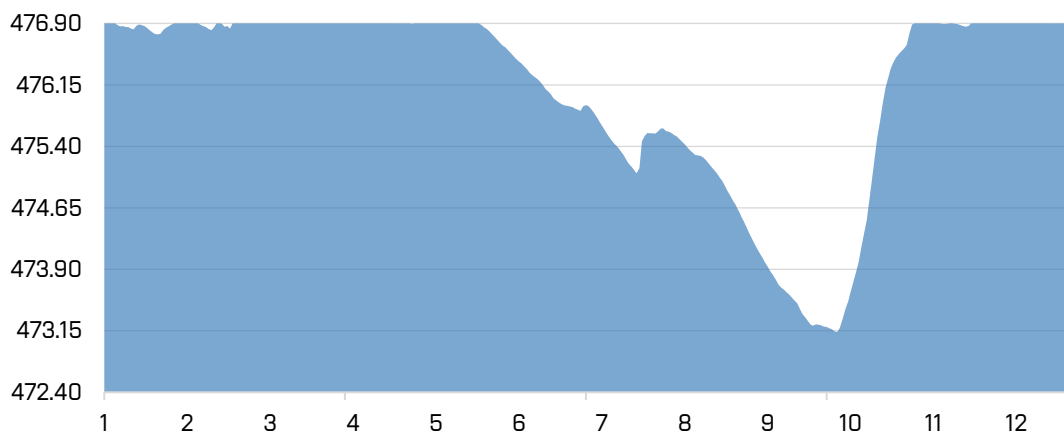
Průběh hladiny v nádrži, 2017



Obr. 10 - Průběh hladiny během simulace provozu v roce 2017

Z průběhu hladiny dle obr. 10 vidíme, že pokles hladiny je způsoben nízkými přítoky do nádrže v letních měsících. Při aplikování navrženého *pravidla řízení 1* na tento simulační model a použití hodnoty odtoku $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, vypadá průběh hladiny takto:

Varianta 1, průběh hladiny v nádrži při $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2017



Obr. 11 - Varianta 1, průběh hladiny během simulace při $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2017

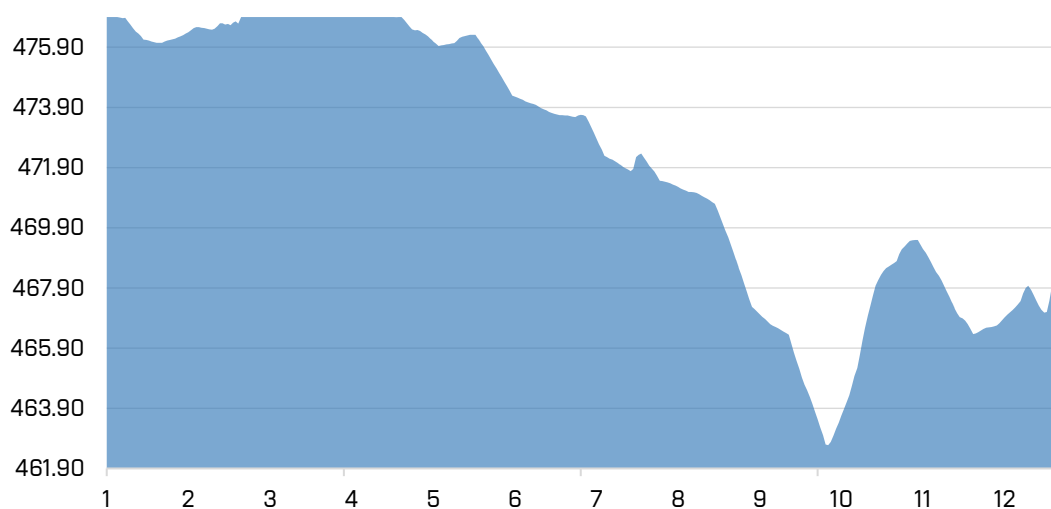
Při tomto navýšení odtoku došlo pouze k malému poklesu hladiny oproti řízení dle stávajících pravidel. Avšak došlo k vyrobení o cca 170 MWh více energie. Tato vyrobená energie přinesla navíc cca 140 tis. Kč. Další navýšování odtoku nám přineslo tyto výsledky:

Tab. 17 – Varianta 1, výsledky simulace provozu pro rok 2017

O [m ³ /s]	H _{min}	H ₂₀₁₇	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D.G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D.G. [MWh]
0.5	473.13	476.90	Ne	1 159 611	141 006	1 353.5	171.5
0.6	472.42	476.90	Ne	1 149 188	130 584	1 345.1	163.0
0.7	471.67	476.90	Ne	1 143 844	125 240	1 342.5	160.4
0.8	470.89	476.85	Ne	1 144 921	126 317	1 347.0	165.0
0.9	470.09	475.98	Ne	1 175 823	157 218	1 381.8	199.8
1.0	469.23	475.06	Ne	1 204 575	185 970	1 414.1	232.0
1.1	468.32	474.08	Ne	1 231 037	212 433	1 444.1	262.0
1.2	467.11	472.87	Ne	1 256 431	237 827	1 474.0	292.0
1.3	465.79	471.58	Ne	1 278 145	259 541	1 500.0	318.0
1.4	464.33	470.19	Ne	1 298 910	280 306	1 525.5	343.5
1.5	462.68	468.68	Ne	1 314 708	296 103	1 545.7	363.7

Při simulaci provozu nádrže v roce 2017 nám aplikace *pravidla řízení 1* dovolila využít až plnou hltnost turbíny aniž by došlo k poruše. Pokles hladiny je však neekonomický. Pokud porovnáme vyrobenou energii při odtocích $O = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a $O = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, pak zjistíme, že i když je odtok trojnásobně větší, vyrobená energie při něm však dělá pouze cca dvojnásobný rozdíl oproti řízení dle stávajících pravidel. Tab. 17 nám udává určitý rozsah hodnot odtoku O , pro něž je vypočítaný předpokládaný peněžní a energetický zisk. Ovšem při řízení je potřeba přihlídnout i na minimální dosaženou hladinu vody v nádrži při daném řízení a na konečnou hladinu ve sledovaném období. Pokud bychom se bavili striktně o jednoročním řízení odtoku, připadaly by v úvahu pouze hodnoty odtoku 0,5; 0,6 a 0,7, příp. 0,8 m³/s, při kterých se nám nádrž po roce opět naplní. Při použití maximální hodnoty odtoku z tab. 17, tedy 1,5 m³/s, průběh hladiny v nádrži by vypadal takto:

Varianta 1, průběh hladiny v nádrži při $O = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2017



Obr. 12 – Varianta 1, průběh hladiny během simulace při $O = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2017

Z obr. 12 je patrné, že při velikosti odtoku $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ se po letních měsících nádrž nestíhá doplnit na hladinu $M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$ Tento odtok je již tak velký, že k poklesu hladiny v nádrži dochází již od poloviny jarních měsíců. I když takto zvolený odtok z nádrže zajišťuje nejvyšší zisk pro toto pravidlo řízení, jeho použití je neekonomické z pohledu zásobní funkce nádrže.

5.2 VARIANTA 2

Tato varianta je kombinací *skupiny tříd 1 a pravidla řízení 2*. Z toho plyne, že při řízení se vychází ze zatřídění daného týdne na základě jeho významu v daném měsíci. Odtok vody z nádrže je ovlivněn navrženým pravidlem, které pracuje se zvoleným dostupným objemem V_D pro vypuštění (viz kap. 4.3.2).

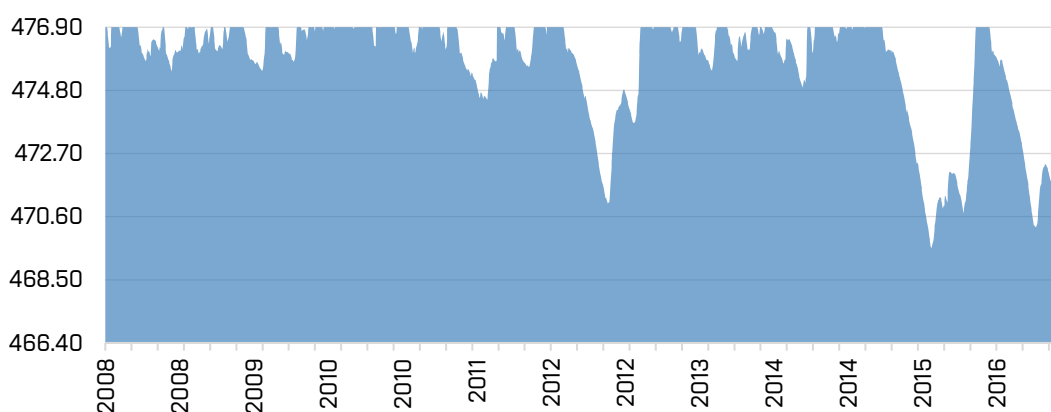
Varianta řízení je aplikována na simulační model vytvořený pro období let 2008 až 2016 s denním krokem. Pro ověření vhodnosti je opět využito i simulačního modelu pro rok 2017 rovněž s denním krokem. Oba simulační modely vycházejí z plné nádrže, tedy hladiny zásobního prostoru $M_z = 476,90 \text{ m n. m.}$ Odtok vody z nádrže pomocí *pravidla řízení 2* je řešen rozpočtem dostupného objemu vody V_D , který se získá zvolením limitní hladiny H_{lim} nižší než je maximální hladina (hladina M_z) a dopočtem rozdílu objemu vody v nádrži k této hladině a hladině M_z . Výpočty byly provedeny v několika krocích, kdy se při každém kroku snížila limitní hladina H_{lim} o jeden metr. Na základě tohoto řízení vznikla tabulka, ve které se jsou shrnuté sledované hodnoty, jimiž jsou minimální hladina dosažená v simulovaném období, hladina na konci simulovaného období, celkový zisk v Kč, celková vyrobená energie v MWh, rozdíl zisku a vyrobené energie oproti řízení dle stávajících pravidel. Získané hodnoty celkového zisku a vyrobené energie, pomocí navrženého řízení v této variantě, pro období let 2008 až 2016 jsou porovnávány s tab. 14. Výsledky variantního řešení ze simulačního modelu pro rok 2017 jsou porovnány s výsledky řízení dle stávajících pravidel z tab. 18.

Tab. 18 – Varianta 2, výsledky simulace provozu období 2008 - 2016

H_{lim}	H_{min}	H_{2016}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
476	469.54	470.34	Ne	18 409 617	359 584	16 196.6	308.0
475	468.08	469.1	Ne	18 700 101	650 068	16 458.6	569.9
474	466.57	467.91	Ne	18 863 944	813 911	16 583.6	694.9
473	466.2	466.46	Ne	18 994 071	944 037	16 669.8	781.2
472	465.92	466.06	Ne	19 084 845	1 034 812	16 725.3	836.7
471	464.47	465.93	Ne	19 141 727	1 091 694	16 735.7	847.1
470	464.35	464.5	Ne	19 218 189	1 168 156	16 788.4	899.8
469	462.82	462.99	Ne	19 261 365	1 211 332	16 803.0	914.4
468	461.67	461.86	Ne	19 271 141	1 221 108	16 798.1	909.5
467	461.45	461.64	Ne	19 271 112	1 221 079	16 795.3	906.7
466	460.00	460.23	Ne	19 267 450	1 217 417	16 784.9	896.2
465	-	-	Ano	-	-	-	-

Jak bylo zmíněno výše, řízení vychází z hladiny $M_z = 476,90$ m n. m. Dle tab. 18 vidíme tedy, že první zvolená limitní hladina H_{lim} je 476,00 m n. m. Při tomto řízení se tedy v každém časovém kroku provádí výpočet dostupného objemu V_D pro vypuštění v průběhu daného týdne. V prvním časovém kroku simulačního modelu byl dostupný objem tedy stanoven jako rozdíl objemů vody v nádrži odpovídajícím hladinám 476,90 m n. m. a 476,00 m n. m. Při tomto způsobu se v simulovaném období let 2008–2016 docílilo zisku téměř 360 tis. Kč. Toto řešení vyneslo i větší množství vyrobené energie oproti řízení dle stávajících pravidel a to o cca 300 MWh.

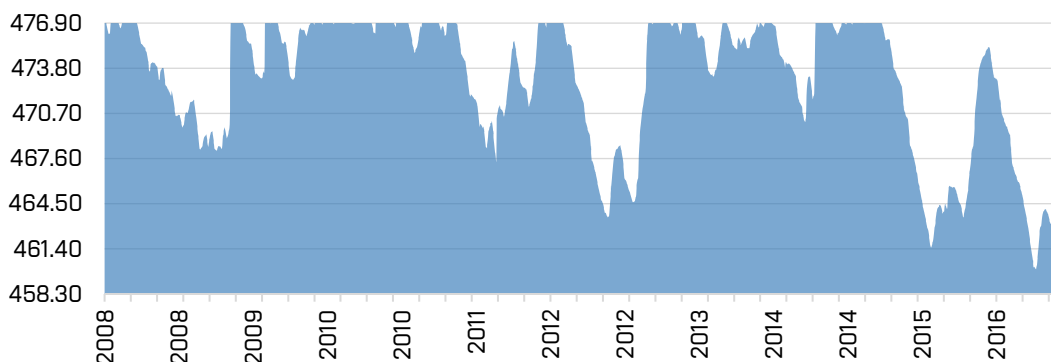
Varianta 2, průběh hladiny v nádrži při $H_{lim} = 476,00$ m n. m., 2008–2016



Obr. 13 – Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,00$ m n. m., 2008–2016

Z obr. 13 je patrné, že toto pravidlo řízení má velký vliv na kolísání hladiny v nádrži. K výraznému poklesu však došlo opět právě až v letech 2015 a 2016, které jsou považovány za velmi suché. Při stanovení limitní hladiny na 466,00 m n. m., která je nejnižší, u které ještě nedocházelo k poruše, vypadal průběh hladiny v nádrži takto:

Varianta 2, průběh hladiny v nádrži při $H_{lim} = 466,00$ m n. m., 2008–2016

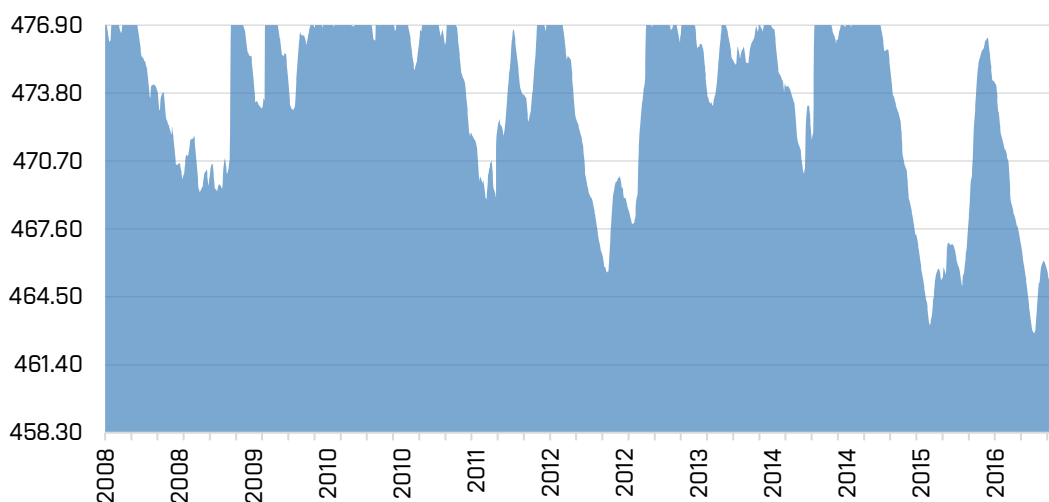


Obr. 14 – Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim}=466,00$ m n. m., 2008–2016

Z obr. 14 lze pozorovat, že i když dochází k velkým poklesům hladiny vody v nádrži v každém roce během letních měsíců, tak během zimních měsíců je nádrž vždy doplněna. Výjimkou jsou opět suché roky 2015 a 2016, kdy dojde k poklesu hladiny téměř na hladinu stálého nadržení $M_s = 458,60$ m n. m.

Navzdory tomu, že při limitní hladině 466,00 m n. m. vypouštíme velké množství vody téměř v každém případě týdne zařazeného ve třídě 1, tak výrazné poklesy hladiny způsobují menší výkon vodní elektrárny. Výkon je především ovlivněn velikostí spádu, který je snížen právě kvůli poklesu hladiny. Z tab. 18 vidíme, že k poklesu výroby energie dochází již při překročení limitní hladiny 469 m n. m. směrem dolů. Právě tato hladina nám zajistila nejvyšší peněžní i energetický zisk. Při této limitní hladině se během simulace pohybovala hladina v nádrži takto:

Varianta 2, průběh hladiny v nádrži při $H_{lim} = 469,00$ m n. m., 2008–2016



Obr. 15 – Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 469,00$ m n. m., 2008–2016

Při této limitní hladině docházelo k velkým poklesům vody v nádrži i rocích, které nejsou brány jako velmi suché. Nicméně se nádrž i v těchto letech zvládla ke konci roku naplnit na hladinu M_z . K největšímu poklesu hladiny došlo opět v suchých letech 2015 a 2016, kdy se při této limitní hladině nádrž v zimních měsících nezvládla naplnit.

Varianta 2 byla otestována i na simulačním modelu provozu nádrže vytvořeným pro rok 2017. Při této simulaci byla limitní hladina postupně snižována o jeden metr při každém provedení simulace. Limitní hladina však byla snižována pouze na hladinu 461 m n. m., kdy již nedocházelo ke změnám u minimální dosažené hladiny, celkového zisku ani celkové vyrobené energii. Tento postup vedl k těmto výsledkům:

Tab. 19 – Varianta 2, výsledky simulace provozu pro rok 2017

H_{lim}	H_{min}	H_{2017}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
476	473.55	476.90	Ne	1 180 321	161 717	1 374.1	192.0
475	472.40	476.59	Ne	1 182 340	163 735	1 385.2	203.2
474	471.55	475.74	Ne	1 206 643	188 038	1 415.4	233.3
473	470.85	474.99	Ne	1 227 823	209 218	1 440.8	258.8
472	469.78	474.12	Ne	1 245 006	226 402	1 463.3	281.3
471	469.09	473.45	Ne	1 258 799	240 195	1 480.6	298.6
470	468.67	473.11	Ne	1 265 314	246 710	1 488.4	306.4
469	467.84	472.48	Ne	1 275 713	257 108	1 501.1	319.0
468	466.93	471.78	Ne	1 285 987	267 382	1 513.5	331.4
467	466.14	471.21	Ne	1 292 999	274 394	1 522.0	340.0
466	466.04	470.97	Ne	1 296 097	277 493	1 525.6	343.6
465	465.04	470.26	Ne	1 304 066	285 462	1 534.3	352.2
464	464.04	469.58	Ne	1 310 154	291 550	1 540.9	358.9
463	463.16	469.00	Ne	1 314 408	295 803	1 545.6	363.6
462	462.68	468.69	Ne	1 316 136	297 531	1 547.5	365.5
461	462.68	468.68	Ne	1 316 156	297 552	1 547.5	365.5

Při porovnání výsledků pro rok 2017 *varianty 2* (tab. 18) a *varianty 1* (tab. 17), pozorujeme, že *varianta 2* je výdělečnější. Vidíme, že například u dosažené minimální hladiny cca $H_{min} = 470$ m n. m. je zde rozdíl vyrobené energie vyšší asi o 80 MWh, což odpovídá cca 40% navýšení této hodnoty oproti *variantě 1*. Ovšem u *varianty 2* se nádrž v zimních měsících nestíhá doplňovat na hladinu zásobního prostoru M_z . Proto by tato varianta vedla spíše na víceleté řízení, nežli na jednoroční. Bohužel z tohoto simulačního modelu nepoznáme, kolika letý cyklus řízení by byl potřeba.

Modifikace varianty 2

Varianta 2 ukázala svůj ziskový potenciál a tak bylo na místě, dostat z jejího řešení ještě lepší výsledky. Toho se docílilo modifikací, která vyjadřovala navýšení výchozí hladiny z $M_z = 476,90$ m n. m. na hladinu 477,86 m n. m. Novou výchozí hladinu jsme dostali po přičtení max. hrubého spádu (32,20 m), který je turbína schopna využít, k min. dolní hladině H_d pod turbínou. Navzdory tomu, že se hladina v nádrži navýšila pouze o necelý metr, přineslo to velmi uspokojivé výsledky. *Modifikace varianty 2* byla testována na stejných dvou modelech jako ostatní varianty. Tedy na simulačním modelu pro období let 2008–2016 s denním krokem a simulačním modelu pro rok 2017 rovněž s denním krokem. Výsledky ze simulačního modelu pro období 2008–2016 byly shrnuty do tabulky. Dle sloupečků H_{min} a H_{2016} lze usoudit, že v porovnání s *variantou 2* je průběh hladiny velmi podobný. Ovšem rozdíl ve vyrobené energii je značně vyšší. V některých řešeních byl nárůst rozdílu vyrobené energie vyšší až o 70%. Testování této modifikace se provedlo opět v postupných krocích, kdy se snižovala limitní

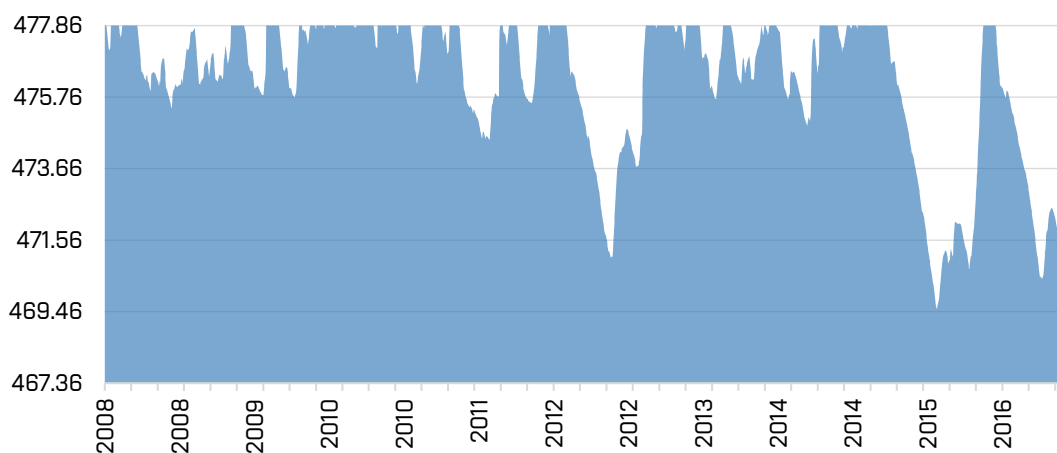
hladina H_{lim} směrem dolů o jeden metr v každém kroku. Získali jsme tím tyto výsledky:

Tab. 20 – Modifikace varianty 2, výsledky ze simulace provozu pro období 2008–2016

H_{max}	H_{lim}	H_{min}	H_{2016}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
477.86	476.9	470.82	471.57	Ne	19 054 853	1 004 820	16 766.1	877.5
477.86	476	469.54	470.52	Ne	19 327 595	1 277 562	17 013.8	1 125.2
477.86	475	468.12	469.30	Ne	19 512 173	1 462 140	17 152.3	1 263.7
477.86	474	467.87	467.99	Ne	19 683 372	1 633 338	17 274.6	1 386.0
477.86	473	467.38	467.82	Ne	19 768 688	1 718 655	17 315.4	1 426.8
477.86	472	466.44	467.29	Ne	19 864 979	1 814 946	17 364.8	1 476.2
477.86	471	465.80	465.93	Ne	19 945 838	1 895 804	17 416.4	1 527.8
477.86	470	464.37	464.52	Ne	19 988 254	1 938 221	17 430.6	1 542.0
477.86	469	463.80	463.96	Ne	20 003 159	1 953 125	17 438.2	1 549.6
477.86	468	463.16	463.32	Ne	20 008 759	1 958 726	17 439.0	1 550.4
477.86	467	461.66	461.85	Ne	20 003 914	1 953 880	17 424.9	1 536.3
477.86	466	460.00	460.23	Ne	19 987 686	1 937 653	17 405.2	1 516.5
477.86	465	-	-	Ano	-	-	-	-

Z tab. 20 je jasně zřetelný značný nárůst vyrobené energie. Při limitní hladině $H_{lim} = 476,00$ m n. m. jsme dosáhli rozdílu oproti řízení dle stávajících pravidel vyššího téměř o 600 MWh. Průběh hladiny při simulaci za těchto podmínek vypadal takto:

Varianta 2, průběh hladiny v nádrži při $H_{lim} = 476,00$ m n. m., 2008–2016



Obr. 16 – Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,00$ m n. m., 2008–2016

Z obr. 16 je jasné, že se při zvolené limitní hladině 476,00 m n. m., kdy dochází k vyššímu rozdílu vyrobené energie o téměř 600 MWh, nádrž zvládá doplnit během zimních měsíců na novou výchozí hladinu 477,86 m n. m. K omezujícím příliš velkým poklesům hladiny došlo opět až v suchých letech 2015 a 2016. Pro ověření tohoto pozitivního zlepšení výsledků byl použit simulační model pro rok 2017. Výsledky z jeho použití jsou vidět v následující tabulce.

Tab. 21 – Modifikace varianty 2, výsledky simulace provozu pro rok 2017

H_{\max}	H_{\lim}	H_{\min}	H_{2017}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
477.86	476.9	474.9	477.86	Ne	1 218 320	199 716	1 419.8	237.7
477.86	476	473.55	477.51	Ne	1 224 225	205 621	1 434.4	252.4
477.86	475	472.84	476.69	Ne	1 252 476	233 872	1 468.4	286.4
477.86	474	471.98	475.88	Ne	1 276 538	257 934	1 498.1	316.0
477.86	473	470.96	475.04	Ne	1 296 913	278 309	1 524.2	342.2
477.86	472	470.77	474.77	Ne	1 303 744	285 139	1 532.7	350.7
477.86	471	469.75	473.96	Ne	1 322 374	303 770	1 554.9	372.9
477.86	470	469.06	473.42	Ne	1 333 135	314 530	1 567.8	385.7
477.86	469	468.00	472.59	Ne	1 347 591	328 986	1 585.0	403.0
477.86	468	468.03	472.47	Ne	1 349 579	330 975	1 587.5	405.5
477.86	467	467.04	471.71	Ne	1 362 029	343 424	1 601.0	419.0
477.86	466	466.04	470.97	Ne	1 372 107	353 502	1 611.9	429.9
477.86	465	465.19	470.37	Ne	1 379 281	360 677	1 619.7	437.7
477.86	464	464.92	470.18	Ne	1 381 246	362 642	1 621.8	439.8
477.86	463	464.92	470.18	Ne	1 381 246	362 642	1 621.8	439.8
477.86	462	464.92	470.18	Ne	1 381 246	362 642	1 621.8	439.8
477.86	458.6	464.92	470.18	Ne	1 381 246	362 642	1 621.8	439.8

Z tab. 21 je zřetelné, že nárůst rozdílu vyrobené energie je o pravdu vyšší i v tomto simulačním modelu. S porovnáním s nemodifikovanou *variantou 2* se při tomto řízení pohybujeme v mírně pozitivnějších hodnotách H_{\min} . Ve spodní části tabulky lze vidět, že se opět s postupným snižováním limitní hladiny nijak nezvyšuje vyrobená energie ani zisk. Pokud první hodnotu z uvedeného ustálení porovnáme s nemodifikovanou *variantou 2*, zjistíme, že se s minimální dosaženou hladinou nacházíme o 1,5 m výše a máme téměř o 75 MWh větší rozdíl vyrobené energie. Tyto výsledky poukazují, že je tato modifikace ekonomicky výhodnější. Avšak výchozí hladina je o téměř 1 m blíže ke koruně hráze a nabízí se otázka, zda by tímto nebyla narušena protipovodňová funkce nádrže.

5.3 VARIANTA 3

Varianta 3 je kombinací skupiny tříd 2 a pravidlem řízení 1. Zatřídění týdnu tedy vychází z jejich významu v rámci celého roku. Pravidlo řízení 1 je pořád stejné. Týká se určení absolutní minimální hodnoty odtoku na základě zatřídění daného týdne.

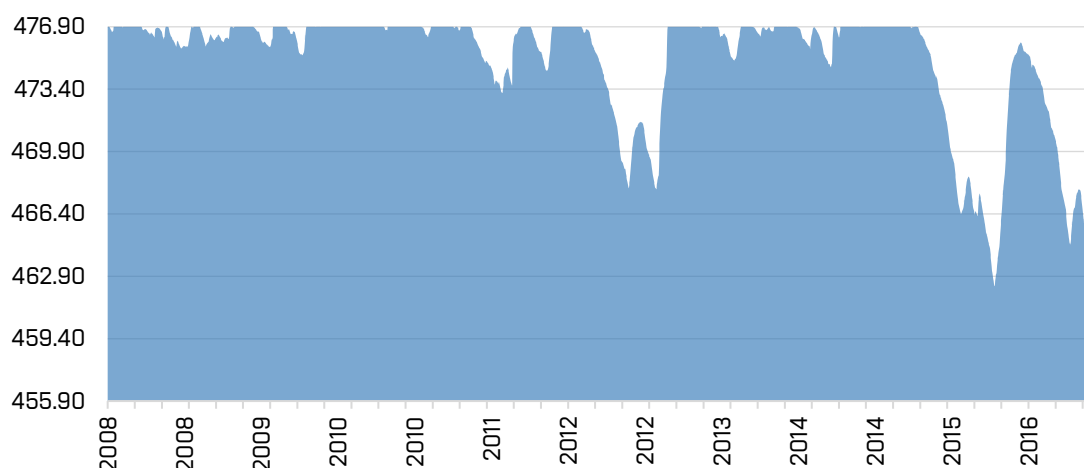
Varianta byla opět testována na dvou simulačních modelech. Jeden pro období let 2008 až 2016 a druhý pro rok 2017. Oba simulační modely opět pracují s denním krokem. Testování této varianty proběhlo stejně jako u varianty 1. Postupně se navyšoval minimální přípustný odtok z nádrže o 0,1 m³/s, čímž jsme opět získali tabulku výsledků pro oba simulační modely.

Tab. 22 – Varianta 3, výsledky simulace provozu období 2008–2016

O [m ³ /s]	H _{min}	H ₂₀₁₆	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
0.5	468.83	468.83	Ne	18 124 346	74 313	15 964.8	76.2
0.6	467.19	467.19	Ne	18 231 986	181 953	16 056.0	167.3
0.7	465.34	465.34	Ne	18 309 769	259 736	16 103.7	215.1
0.8	462.73	462.73	Ne	18 412 324	362 291	16 172.2	283.6
0.86	458.82	458.82	Ne	18 449 139	399 106	16 200.6	312.0
0.9	-	-	Ano	-	-	-	-

Z tab. 22 vidíme, že varianta 3 se moc neliší od varianty 1, je zde ovšem malý nárůst zisku i vyrobené energie. Při vstupující hodnotě odtoku $O = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ lze dokonce pozorovat menší zisk i množství vyrobené energie oproti variantě 1 (viz tab. 15). Jak bylo zmíněno v kapitole 4.3.1, skupina tříd 2 má tendenci více pošetrřit vodu v nádrži nežli řízení dle skupiny tříd 1. Tuto skutečnost lze ověřit porovnáním sloupečků H_{min} z tab. 22 a tab. 15, kdy zjistíme, že u varianty 3 jsou hodnoty poněkud vyšší. To nám také dovolilo zvýšit odtok O až na hodnotu $0,86 \text{ m}^3/\text{s}$, což je nejvyšší možný odtok, který nám nezpůsobí poruchu (snížení hladiny v nádrži na/pod hladinu stálého nadržení). Z tabulky vidíme, že minimální hladina dosažená během simulace je shodná s hladinou v poslední časový krok simulace (sloupeček H_{2016}). Z toho se dá vyvodit, že k největšímu poklesu vody došlo opět v suchých letech 2015 a 2016. Tvrzení je ověřeno následujícím grafem, vyjadřujícím průběh hladiny během simulace řízení s využitím varianty 3.

Varianta 3, průběh hladiny v nádrži při $O = 0,86 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016



Obr. 17 – Varianta 3, průběh hladiny během simulace při $O = 0,86 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016

Varianta 3 byla otestována i na simulačním modelu pro 2017, jak bylo zmíněno výše. Při simulaci se podařilo postupným navyšováním hodnoty minimálního odtoku z nádrže dosáhnout hodnoty maximální hltnosti turbíny, tedy $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Dosažené výsledky z této simulace vykazovaly drobný nárůst finančního i energetického zisku, stejně jako simulace provozu v období let 2008 až 2016. Můžeme se o tom přesvědčit následující tabulkou s výsledky.

Tab. 23 – Varianta 3, výsledky simulace provozu pro rok 2017

O [m^3/s]	H_{\min}	H_{2017}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
0.5	473.42	476.90	Ne	1 162 129	143 524	1 354.6	172.6
0.6	472.81	476.90	Ne	1 156 604	138 000	1 351.2	169.2
0.7	472.17	476.90	Ne	1 150 336	131 732	1 346.5	164.5
0.8	471.51	476.80	Ne	1 162 511	143 907	1 361.9	179.8
0.9	470.83	475.85	Ne	1 199 677	181 072	1 402.7	220.7
1.0	470.12	474.85	Ne	1 234 545	215 940	1 441.1	259.1
1.1	469.38	473.78	Ne	1 266 955	248 350	1 476.9	294.9
1.2	468.60	472.64	Ne	1 296 718	278 113	1 509.8	327.8
1.3	467.79	471.43	Ne	1 323 663	305 058	1 539.7	357.7
1.4	466.92	470.14	Ne	1 347 573	328 969	1 566.4	384.4
1.5	466.00	468.74	Ne	1 368 107	349 503	1 589.6	407.5

Při porovnání s variantou 1 (tab. 17) vidíme, že opět dosahujeme mírně lepších výsledků jak z pohledu ceny, tak i vyrobené energie. Při porovnání sloupečků H_{\min} pozorujeme, že varianta 3 založená na skupině tříd 2 dosahuje vyšších hodnot minimální dosažené hladiny. Dá se tedy říct, že je výhodnější jak z pohledu zásobní, tak i hydroenergetické funkce.

5.4 VARIANTA 4

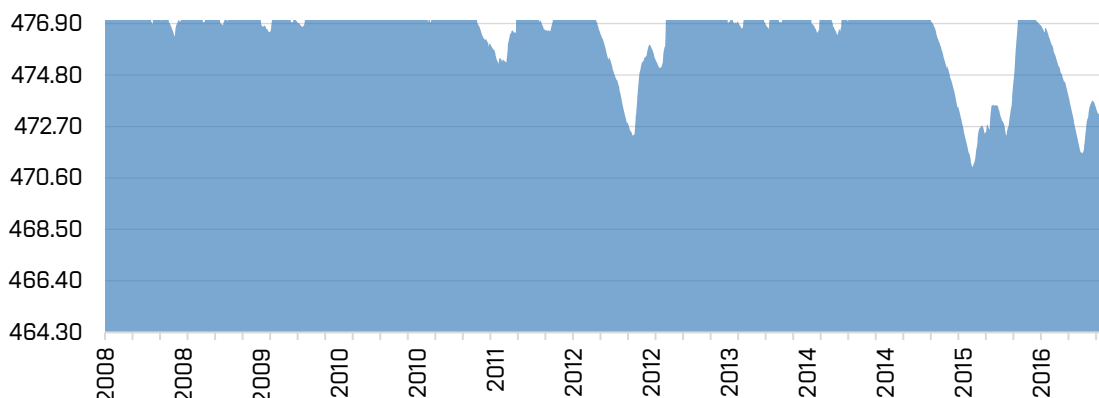
Poslední variantou je zbylá kombinace *skupiny tříd 2 a pravidla řízení 2*. Navržené řízení je tedy založeno na rozpočtu využitelného objemu V_D k vypuštění v rámci daného týdne, jenž byl zařazen do třídy 1 na základě jeho významu v roce. Tato varianta je téměř shodná s *variantou 2*. Liší se pouze ve skupině tříd. Navržené řízení ve *variantě 4* bylo testováno na dvou simulačních modelech shodných jako u předchozích variant. Simulační modely opět vycházejí z plné nádrže, tedy hladiny $M_z = 476,90$ m n. m. Při použití *pravidla řízení 2* se stanovuje limitní hladina, od které se pak odvíjí dostupný objem V_D k vypuštění v daném týdnu. Pro získání tabulky s výsledky několika řešení se postupovalo stejně jako u *varianty 2*, kdy se při každém řešení postupně snižovala limitní hladina H_{lim} . Opět se sledoval objem vyrobené energie v daném období a celkový zisk za tuto energii.

Tab. 24 – Varianta 4, výsledky simulace provozu v období 2008–2016

H_{lim}	H_{min}	H_{2016}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
476	469.77	470.75	Ne	18 377 581	327 547	16 152.5	263.8
475	469.24	470.03	Ne	18 712 115	662 081	16 434.6	546.0
474	468.90	469.37	Ne	18 876 979	826 946	16 577.0	688.4
473	476.87	469.21	Ne	18 968 336	918 302	16 628.5	739.8
472	467.49	468.00	Ne	19 069 551	1 019 518	16 698.3	809.7
471	466.41	467.86	Ne	19 138 724	1 088 691	16 724.2	835.6
470	466.06	466.63	Ne	19 213 204	1 163 171	16 783.0	894.3
469	465.86	466.50	Ne	19 264 436	1 214 403	16 811.5	922.9
468	464.81	465.92	Ne	19 295 284	1 245 251	16 820.6	932.0
467	464.03	464.75	Ne	19 289 073	1 239 039	16 808.7	920.1
466	462.75	463.55	Ne	19 284 043	1 234 010	16 796.3	907.7
465	462.10	462.32	Ne	19 272 672	1 222 639	16 780.7	892.1
464	460.76	461.02	Ne	19 252 052	1 202 018	16 754.9	866.2
463	459.32	459.62	Ne	19 227 762	1 177 729	16 724.6	836.0
462	-	-	Ano	-	-	-	-

Od limitní hladiny 468 m n. m. vidíme, že klesá množství vyrobené energie a tím i celkový zisk. Můžeme tedy říci, že pokračovat s limitní hladinou níže je kontraproduktivní a neekonomické. Nejvyššího zisku i množství vyrobené energie bylo dosaženo při limitní hladině 468 m n. m. Celkový zisk během této simulace provozu činil cca 19,3 mil. Kč. Rozdíl v celkovém zisku oproti simulaci řízení při použití stávajících pravidel manipulačního řádu byl tedy cca 1,25 mil. Kč. Tento rozdíl byl dosažen díky většímu množství vyrobené energie. Rozdíl vyrobené energie oproti řízení dle stávajícího dispečerského grafu činil 932 MWh. Během simulace při $H_{lim} = 468$ m n. m. vypadal průběh hladiny následovně:

Varianta 4, průběh hladiny v nádrži při $H_{lim} = 468,00$ m n. m., 2008–2016



Obr. 18 - Varianta 4, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 468,00$ m n. m., 2008–2016

Dle obr. 18 lze pozorovat velké kolísání hladiny v průběhu celé simulace. Avšak v zimních měsících se nádrž zvládala naplnit na výchozí hladinu M_z . Při porovnání s *variantou 2* je toto řízení odtoku šetrnější s pohledu zásoby vody v nádrži a výhodnější z hlediska vyrobené energie. Pro limitní hladinu 468 m n. m. jsme zde vyrobili o 932 MWh více energie než při použití stávajících pravidel. S použitím *varianty 2* bylo vyrobeno o 909,5 MWh více oproti stávajícím pravidlům řízení odtoku. U *varianty 2* jsme se při $H_{lim} = 468$ m n. m. nacházeli již v části tabulky, kde docházelo k poklesu vyrobené energie a celkového zisku (viz tab. 18).

Tab. 25 - Varianta 4, výsledky simulace provozu 2017

H_{lim}	H_{min}	H_{2017}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
476	473.59	476.57	Ne	1 202 958	184 354	1 397.5	215.4
475	473.20	475.61	Ne	1 242 884	224 280	1 441.3	259.3
474	472.09	474.67	Ne	1 267 442	248 838	1 473.0	291.0
473	471.32	473.77	Ne	1 290 569	271 965	1 501.0	319.0
472	470.92	473.20	Ne	1 306 772	288 168	1 519.0	336.9
471	470.23	472.54	Ne	1 319 706	301 102	1 534.3	352.3
470	469.18	471.62	Ne	1 334 762	316 157	1 552.5	370.5
469	468.76	471.26	Ne	1 339 797	321 193	1 558.7	376.7
468	468.05	470.46	Ne	1 351 197	332 593	1 571.3	389.3
467	467.05	469.61	Ne	1 361 204	342 599	1 582.3	400.2
466	466.21	468.91	Ne	1 368 151	349 547	1 589.9	407.9
465	466.00	468.74	Ne	1 369 656	351 052	1 591.5	409.5
464	466.00	468.74	Ne	1 369 656	351 052	1 591.5	409.5
463	466.00	468.74	Ne	1 369 656	351 052	1 591.5	409.5
458.6	466.00	468.74	Ne	1 369 656	351 052	1 591.5	409.5

V tabulce 25 jsou uvedeny výsledky simulace provozu pro rok 2017. Stejně jako u *varianty 2* vidíme, že ve spodní části tabulky došlo k ustálení vyrobené energie bez ohledu na snížení limitní hladiny. K této skutečnosti došlo již u $H_{lim} = 465$ m n. m., kdyžto u *varianty 2* k ustálení sledovaných hodnot došlo až při limitní hladině 462 m n. m.

Pokud porovnáme nejvyšší celkový zisk této *varianty* a *varianty 2*, zjistíme, že *varianta 4* je výnosnější cca o 50 tis. Kč s tím, že se vyrobilo asi o 40 MWh více. Vyšší zisky a větší objem vyrobené energie však neměly takový vliv na polohu hladiny v nádrži. I když je pokles velmi výrazný, není však tak velký jako u *varianty 2*. Z těchto důvodů se dá *varianta 4* považovat za výhodnější.

Modifikace varianty 4

Stejně jako *varianta 2* má i tato *varianta* možnost určité modifikace. Modifikace spočívá ve zvýšení výchozí hladiny až na hladinu maximálního hrubého spádu, který je turbína schopna využít. Výchozí hladina pro oba simulační modely je tedy 477.86 m n. m.

Modifikovaná varianta 4 byla testována, stejně jako ostatní *varianty*, na dvou simulačních modelech. Tedy simulačním modelem pro období let 2008 až 2016 a pro rok 2017. Oba simulační modely pracují s denním krokem.

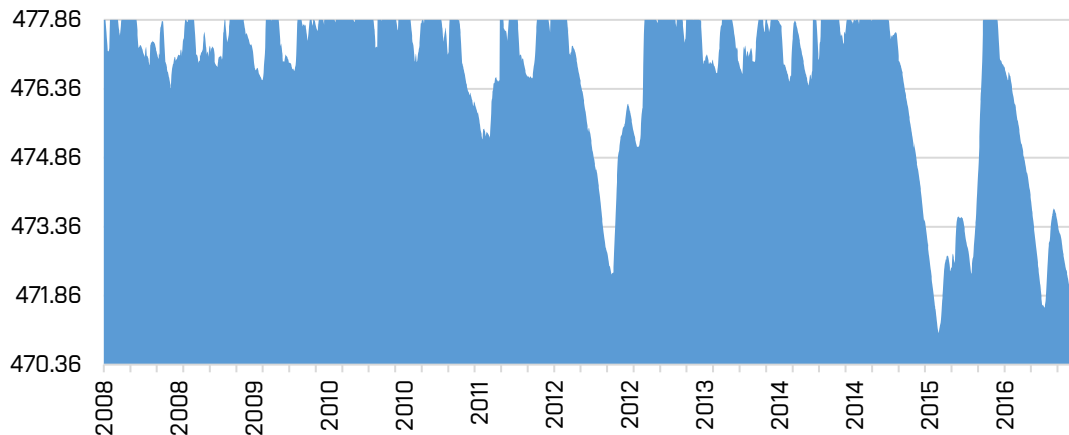
Tab. 26 – Modifikace varianty 4, výsledky simulace provozu období 2008–2016

$H_{h,lim}$	$H_{d,lim}$	H_{min}	H_{2016}	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
477.86	476.9	471.05	472.00	Ne	19 022 938	972 905	16 720.7	832.0
477.86	476	470.69	471.33	Ne	19 334 711	1 284 677	16 983.2	1 094.5
477.86	475	470.38	470.81	Ne	19 518 536	1 468 502	17 138.8	1 250.2
477.86	474	469.44	470.43	Ne	19 634 750	1 584 717	17 211.2	1 322.6
477.86	473	468.99	469.56	Ne	19 756 590	1 706 556	17 291.6	1 403.0
477.86	472	468.08	469.06	Ne	19 840 802	1 790 769	17 336.6	1 447.9
477.86	471	467.71	468.21	Ne	19 928 596	1 878 562	17 406.9	1 518.3
477.86	470	467.09	468.20	Ne	19 977 740	1 927 707	17 424.0	1 535.4
477.86	469	466.47	467.07	Ne	19 993 885	1 943 852	17 430.2	1 541.6
477.86	468	465.26	465.92	Ne	19 994 444	1 944 410	17 423.6	1 535.0
477.86	467	464.57	464.75	Ne	19 988 393	1 938 360	17 413.1	1 524.4
477.86	466	463.36	463.55	Ne	19 974 421	1 924 388	17 393.9	1 505.2
477.86	465	462.10	462.32	Ne	19 957 372	1 907 338	17 370.9	1 482.3
477.86	464	460.76	461.02	Ne	19 926 787	1 876 754	17 335.7	1 447.1
477.86	463	459.32	459.62	Ne	19 893 236	1 843 203	17 296.9	1 408.2
477.86	462	-	-	Ano	-	-	-	-

Z tabulky 26 je jasně vidět, že tato modifikace se vyplatila stejně jako u *varianty 2*. Například pro limitní hladinu 476,90 m n. m. je nárůst vyrobené energie 568,2 MWh. Při simulaci zde nedošlo k ustálení zisku a vyrobené energie, ale bylo dosaženo maxima při $H_{lim} = 469$ m n. m. a při dalším snížení již vyrobená energie

i zisk klesaly. Pokud tuto variantu aplikujeme pouze pro dostupný objem vody, který se nachází nad nynější hladinou zásobního prostoru, tedy 476,90 m n. m., dokážeme získat o 832 MWh vyrobené energie oproti řízení dle stávajících pravidel. Při této limitní hladině byl následující průběh polohy hladiny v nádrži během simulace:

Modifikace varianty 4, průběh hladiny při $H_{lim} = 476,90$ m n. m., 2008-2016



Obr. 19 – Modifikace varianty 4, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,90$ m n. m., 2008-2016

Obrázek 19 vyjadřuje průběh hladiny při limitní hladině 476,90 m n. m.. Odpovídá tedy prvnímu řádku tabulky 26. Vidíme, že k výrazným poklesům hladiny docházelo pouze v suchých letech. Díky tomu, že toto variantní řešení je aplikováno pouze, pokud se hladina vody v nádrži nachází nad úrovní hladiny $M_z = 476,90$ m n. m., můžeme říct, že průběh hladiny je velice podobný průběhu při použití stávajících pravidel řízení (viz obr. 8). Dokonce i minimální dosažená hladina během simulace se nachází výše než u stávajících pravidel.

Pokud ale porovnáme tuto modifikovanou variantu s *modifikovanou variantou 2*, zjistíme, že je mírně nevýhodnější s pohledu zisku i objemu vyrobené energie. *Modifikovaná varianta 4* dávala během jednotlivých simulací s postupným snižováním limitní hladiny mírně horší výsledky. Avšak tento rozdíl je vykompenzován přijatelnější polohou hladiny v nádrži. V některých případech se jedná i 3,5 m vyšší polohu hladiny v nádrži než u *modifikované varianty 2*.

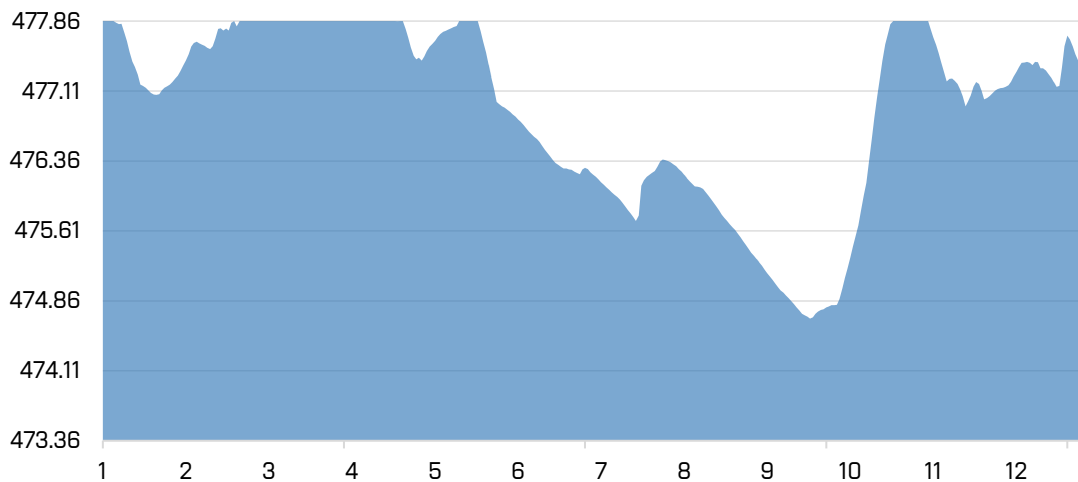
Ziskový potenciál této varianty byl také ověřen na nezávislém simulačním modelu pro rok 2017 rovněž s denním krokem. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 27 – Modifikace varianty 4, výsledky simulace pro rok 2017

H _{h,lim}	H _{d,lim}	H _{min}	H ₂₀₁₇	Poruchy	Zisk [Kč]	Rozdíl oproti D. G. [Kč]	Energie [MWh]	Rozdíl oproti D. G. [MWh]
477.86	476.9	474.67	477.44	Ne	1 246 722	228 117	1 448.1	266.1
477.86	476	474.31	476.58	Ne	1 286 393	267 788	1 491.9	309.8
477.86	475	473.22	475.64	Ne	1 314 551	295 946	1 527.8	345.8
477.86	474	472.58	474.79	Ne	1 341 088	322 484	1 559.0	376.9
477.86	473	471.98	474.13	Ne	1 359 912	341 308	1 580.4	398.4
477.86	472	471.27	473.46	Ne	1 375 431	356 827	1 598.7	416.6
477.86	471	470.25	472.56	Ne	1 392 720	374 116	1 619.3	437.3
477.86	470	470.04	472.21	Ne	1 399 489	380 884	1 626.9	444.9
477.86	469	469.04	471.33	Ne	1 414 516	395 912	1 643.2	461.2
477.86	468	468.12	470.53	Ne	1 426 439	407 834	1 656.2	474.2
477.86	467	467.77	470.23	Ne	1 430 319	411 714	1 660.3	478.3
477.86	466	467.77	470.23	Ne	1 430 319	411 714	1 660.3	478.3
477.86	465	467.77	470.23	Ne	1 430 319	411 714	1 660.3	478.3
477.86	458.6	467.77	470.23	Ne	1 430 319	411 714	1 660.3	478.3

Z tab. 27 vidíme, že při simulaci pro rok 2017 došlo opět k ustálení výsledků od limitní hladiny 467,00 m n. m. Nicméně porovnáním posledního sloupce z této tabulky a z tabulky 25 zjistíme, že modifikovaná varianta je výnosnější. Například pro první řádek tabulek, tedy limitní hladinu 476,90 m n. m. jsme docílili vyššího objemu vyrobené energie o 50 MWh, což nám vyneslo o cca 40 tis. Kč více. Pokud bychom opět uvažovali využití pouze tohoto řešení, tedy limitní hladiny 476,90 m n. m., která odpovídá hladině zásobního prostoru, vidíme, že se na konci simulace stále pohybujeme nad hladinou zásobního prostoru. V této situaci dokážeme získat o 266 MWh více energie než při použití stávajících pravidel řízení.

Modifikace varianty 4, průběh hladiny při $H_{lim} = 476,90$ m n. m., 2017



Obr. 20 – modifikace varianty 4, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,90$ m n. m., 2017

Během simulace aplikace *modifikované varianty 4* při limitní hladině 476,90 m n. m. došlo k výraznému poklesu vody pouze v letních měsících. Stejně tak tomu je i při použití stávajících pravidel řízení. V ostatních měsících se hladina v nádrži nacházela téměř pořád na hladinou $M_z = 476,90$ m n. m. Můžeme tedy říct, že v rámci této simulace nemá *modifikovaná varianta 4* negativní vliv na zásobní funkci nádrže. Na hydroenergetickou funkci má však velmi pozitivní vliv, kdy jsme byli schopni dostat o 266 MWh energie více. Průběh hladiny během této simulace je zobrazen na obrázku 20.

Pokud výsledky z tabulky 27 porovnáme s výsledky *modifikované varianty 2* (viz tab. 21), zjistíme, že *modifikovaná varianta 4* je o něco výnosnější s výrazně menším poklesem hladiny v nádrži během simulace. Z tab. 27 vidíme, že H_{min} se nedostane během simulace pod hodnotu 467 m n. m. Díky této skutečnosti tedy dochází k ustálení maximálního zisku a objemu vyrobené energie již při $H_{lim} = 467,00$ m n. m. Kdežto u *modifikované varianty 2* se minimální dosažená hladina během simulace dostala na hodnotu 464,90 m n. m., než došlo k ustálení maxim sledovaných výsledků. Můžeme tedy s jistotou říct, že *modifikovaná varianta 4* vytvořila energetický zisk cca 40 MWh s využitím objemu v nádrži odpovídajícího výšce cca 3 m. Toto navýšení vyrobené energie odpovídá finančnímu zisku cca 50 tis. Kč.

6 ZÁVĚR

Náplní práce bylo navrhnout pravidlo řízení hydroenergetické funkce nádrže Mostiště 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 simulačního modelu a návržení nových pravidel řízení. Následně bylo řešeno zpracování vstupních dat, tedy časová řada denní průměrné ceny za elektrickou energii a průtoková řada denních průměrných přítoků do nádrže Mostiště. Průběh vývoje ceny za elektrickou energii byl převzat z webového portálu <http://www.kurzy.cz/>. Průtoková řada byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem.

V další části práce byly sestaveny dva simulační modely pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel. První simulační model provozu nádrže byl vytvořen pro období let 2008–2016 a druhý pro rok 2017. Oba simulační modely pracují s denním krokem. Simulační modely jsou sestaveny tak, že vycházejí z plné nádrže, tedy z hladiny $M_z = 476,90$ m n. m. Řízení odtoku je pro oba modely zajišťováno stávajícími pravidly řízení – dispečerským grafem z manipulačního řádu VD Mostiště. Součástí simulačních modelů je i výpočet hydroenergetického potenciálu. Tento výpočet probíhá taktéž s denním krokem. Jeho součástí je výpočet hrubého spádu, vyrobeného výkonu, přepočten na vyrobenou energii za den a výpočet denního zisku za vyrobenou energii. Pro zjednodušení simulace a jednotlivých výpočtů byla zavedena zjednodušení, jako zanedbání ztrát výparem z volné hladiny, zanedbání ztrát na vtoku do turbíny, které nejsou zápočítány v účinnosti turbíny, neuvažuje se s proplachem.

V následující části této práce je řešena problematika návrhu nových pravidel řízení. Na základě zpracování vstupních dat (vývoje ceny za elektrickou energii na trhu) byly zpracovány dvě skupiny tříd. Tyto skupiny pomocí ohodnocení jednotlivých týdnů v roce na základě jejich významu z pohledu cenové situace elektrické energie na trhu, zařazují zmíněné týdny do tří tříd. Jednotlivé třídy jsou pak rozhodujícím kritériem pro použití navrženého pravidla řízení. Pravidla řízení jsou navržena rovněž dvě. Pravidla jsou navržena tak, aby neurčovala absolutní hodnotu odtoku z nádrže, ale pouze minimální odtok z nádrže. To je zajištěno úpravou hodnoty v manipulačním řádu, která vstupuje do simulačních modelů. První pravidlo řízení ovlivňuje minimální hodnotu odtoku z nádrže na základě subjektivního zvolení absolutní hodnoty, neměnné v průběhu simulace. Druhé pravidlo řízení odtoku z nádrže vychází ze zvolení limitní hladiny, z níž je následně dopočítán dostupný objem V_D k vypuštění během daného týdne. Hodnota odtoku zde již není neměnná pro celou simulaci, ale je dopočítávána pro každý časový

krok (den) simulačního modelu. Jednotlivými kombinacemi dvou skupin tříd a dvěma pravidly řízení jsme dostali 4 varianty řízení. Všechny varianty byly testovány na simulačním modelu pro období 2008 až 2016 a jejich vhodnost ověřena na simulačním modelu pro rok 2017.

V závěrečné části práce jsou popsány jednotlivé varianty navrženého řízení. *Varianta 1* je kombinací *skupiny tříd 1* a *pravidla řízení 1*. Odtok vody z nádrže je tedy ovlivněn zatříděním daného týdne na základě jeho významu v rámci jednotlivých měsíců v roce a proveden navýšením minimální hodnoty. *Varianta 2* je pak výsledkem kombinace *skupiny tříd 1* a *pravidlem řízení 2*. Zařazení týdnů do jednotlivých tříd je tedy provedeno stejně jako u *varianty 1*. Dle *pravidla řízení 2* je velikost odtoku vody z nádrže řešena výpočtem dostupného objemu V_D . Využití *pravidla řízení 2* u této varianty vedlo k tomu, že se dalo využít jisté modifikace. Modifikace varianty spočívá pouze v navýšení výchozí hladiny v nádrži pro simulaci provozu až na hladinu 477.86 m n. m., která odpovídá maximálnímu hrubému spádu, jež dokáže turbína využít. *Varianty 3 a 4* jsou obdobné jako *varianty 1 a 2*. Liší se pouze v tom, že u nich byla použita *skupina tříd 2*. *Varianta 3* je tedy kombinací *skupiny tříd 2* a *pravidla řízení 1*, *varianta 4* *skupiny tříd 2* a *pravidla řízení 2*. Jelikož u *varianty 4* je využito *pravidlo řízení 2*, byla zde provedena i modifikace, stejná jako u *varianty 2*. Jedná se tedy o modifikování varianty navýšením výchozí hladiny v simulačním modelu na hodnotu 477,86 m n. m.

Veškeré výsledky z variantních řízení byly zpracovány do tabulek. Výsledky pak byly porovnány s výsledky dosaženými pomocí řízení dle stávajících pravidel. Ukázalo se, že všechny čtyři varianty mají ziskový potenciál jak finančního typu, tak energetického. Kromě zisku a objemu vyrobené energie byly sledovány i minimální dosažené hladiny v průběhu simulací a hladiny na konci simulací, abychom mohli do jisté míry kontrolovat i zásobní funkci nádrže.

Z vyhodnocení bylo zjištěno, že nejlepších výsledků zisku a objemu vyrobené energie s ohledem na průběh hladiny během simulace dosahovaly *varianty 2 a 4*, které byly ještě vylepšeny jejich modifikacemi. Z tohoto se dá usoudit, že navržené *pravidlo řízení 2* je klíčové pro dosažení vyšších zisků a objemů vyrobené energie.

Na závěr lze tedy říci, že bylo dosaženo vytyčených cílů v úvodu práce. Pozitivní potenciál prvotní myšlenky byl ověřen, avšak pouze při zavedených zjednodušení při výpočtech a zpracování vstupních dat. Myslím, že tato práce je velkým přínosem a proto by bylo určitě zajímavé v dané problematice pokračovat a postupně tak eliminovat zavedená zjednodušení a výsledky tak více zpřesnit.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MOTLÍK, Jan, Libor ŠAMÁNEK a Josef ŠTEKL. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. In: Praha: CRUX, 2007, s. 186. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf
- [2] VOBOŘIL, David. *Přečerpávací vodní elektrárny v České republice*. In: *O energetice* [online]. 3. 1. 2017. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>
- [3] *Zákon č. 254/2001 Sb.: Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)*. In: . Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>
- [4] *Vodní nádrž Mostiště*. 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
- [5] *Povodí Moravy: VD Mostiště* [online]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/mostiste/>
- [6] *Manipulační řád: VD Mostiště na Oslavě v km 65,948* [online]. Jihlava, 2013.
- [7] STARÝ, Miloš. *Nádrže a vodohospodářské soustavy: MODUL 01* [online]. 2006.
- [8] VOTRUBA, L. a V. BROŽA. *Hospodaření s vodou v nádržích* [online]. Praha: SNTL/ALFA, 1980.
- [9] ŘÍHA, J. a kol. *Hydrotechnické stavby II*. Brno: VUT, 2006, 103 s.
- [10] *Kurzy.cz* [online]. 2018. Dostupné také z: <https://www.kurzy.cz/>
- [11] *Power Exchange Central Europe, a.s.* [online]. 2018. Dostupné také z: <http://www.pxe.cz/>

8 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Přirozené variační rozpětí odtoku, vzor převzat z [7].	10
Obr. 2 - Požadované variační rozpětí odtoku, vzor převzat z [7].	10
Obr. 3 - Základní typy dispečerských grafů, vzor převzat z [7].	11
Obr. 4 - Schematizace nádrže, vzor převzat z [7].	15
Obr. 5 - Diagram hierarchie problematiky	20
Obr. 6 - Četnosti ohodnocených týdnů 1. "měsíce" pro období 2008–2016	22
Obr. 7 - Průběh hladiny během simulace provozu v období 2008–2016	33
Obr. 8 - Varianta 1, průběh hladiny v nádrži při $O = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016	34
Obr. 9 - Varianta 1, průběh hladiny během simulace při $O = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016	35
Obr. 10 - Průběh hladiny během simulace provozu v roce 2017	36
Obr. 11 - Varianta 1, průběh hladiny během simulace při $O = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2017 ...	36
Obr. 12 - Varianta 1, průběh hladiny během simulace při $O = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, 2017 ...	37
Obr. 13 - Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,00 \text{ m n. m.}$, 2008–2016	39
Obr. 14 - Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 466,00 \text{ m n. m.}$, 2008–2016	39
Obr. 15 - Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 469,00 \text{ m n. m.}$, 2008–2016	40
Obr. 16 - Varianta 2, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,00 \text{ m n. m.}$, 2008–2016	42
Obr. 17 - Varianta 3, průběh hladiny během simulace při $O = 0,86 \text{ m}^3/\text{s}$, 2008–2016	45
Obr. 18 - Varianta 4, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 468,00 \text{ m n. m.}$, 2008–2016	47
Obr. 19 - Modifikace varianty 4, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,90 \text{ m n. m.}$, 2008–2016	49
Obr. 20 - modifikace varianty 4, průběh hladiny během simulace při $H_{lim} = 476,90 \text{ m n. m.}$, 2017	51

9 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 - Základní hydrologické údaje [5]	5
Tab. 2 - N-leté průtoky [5]	6
Tab. 3 - M-denní průtoky [5]	6
Tab. 4 - Dvoustupňový dispečerský graf	17
Tab. 5 - Ukázka řízení odtoku vody z nádrže pomocí simulačního modelu	18
Tab. 6 - Ukázka výpočtu výkonu, elektrické energie a denního zisku	19
Tab. 7 - Ukázka zkrácení roku	21
Tab. 8 - Ukázka přiřazení váhy, výpočet průměru vah, určení významu	21
Tab. 9 - Ukázka zatřídění týdnů prvních čtyř "měsíců" v systému tříd 1	24
Tab. 10 - Ukázka zatřídění týdnů prvních čtyř "měsíců" v systému tříd 2	26
Tab. 11 - Ukázka pravidla řízení 1	28
Tab. 12 - Ukázka pravidla řízení 2	30
Tab. 13 - Podmínky řízení	31
Tab. 14 - Výsledky simulace dle stávajících pravidel řízení, 2008–2016	33
Tab. 15 – Varianta 1, výsledky simulace provozu pro období 2008 – 2016	34
Tab. 16 - Výsledky simulace provozu dle stávajících pravidel řízení, 2017	35
Tab. 17 – Varianta 1, výsledky simulace provozu pro rok 2017	37
Tab. 18 – Varianta 2, výsledky simulace provozu období 2008 - 2016	38
Tab. 19 – Varianta 2, výsledky simulace provozu pro rok 2017	41
Tab. 20 – Modifikace varianty 2, výsledky ze simulace provozu pro období 2008–2016	42
Tab. 21 – Modifikace varianty 2, výsledky simulace provozu pro rok 2017	43
Tab. 22 – Varianta 3, výsledky simulace provozu období 2008–2016.....	44
Tab. 23 – Varianta 3, výsledky simulace provozu pro rok 2017	45
Tab. 24 – Varianta 4, výsledky simulace provozu v období 2008–2016.....	46
Tab. 25 - Varianta 4, výsledky simulace provozu 2017.....	47
Tab. 26 – Modifikace varianty 4, výsledky simulace provozu období 2008–2016	48
Tab. 27 – Modifikace varianty 4, výsledky simulace pro rok 2017.....	50