

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Václav Novotný

Řízení systému vodní kaskády

Katedra řídicí techniky

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radek Beňo

Studijní program: Kybernetika a robotika

Studijní obor: Systémy a řízení

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Václav Novotný**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Řízení systému vodní kaskády**

Pokyny pro vypracování:

1. Zkonstruujte vhodný jednoduchý model vodní kaskády.
2. Shromážděte reálná naměřená data z vámi vybrané vodní kaskády.
3. Identifikujte a verifikujte model z nashromážděných dat.
4. Proveďte simulaci povodňové vlny na modelu, zvolte vhodné počáteční podmínky, různé scénáře povodňové vlny.
5. Navrhňte algoritmus distribuovaného řízení vodní kaskády a vyhodnoťte výsledky oproti současnému řízení zvolené vodní kaskády.

Seznam odborné literatury:

- [1] W.S. Janna. Introduction to Fluid Mechanics, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2010
- [2] J. Chroumal. Vyhodnocení povodní v červnu 2013, Ministerstvo životního prostředí, Praha 2013
- [3] M. Kredba a kolektiv. Vltavská kaskáda. Praha: MLVH, 1969
- [4] F.T. Brown. Engineering system dynamics: A Unified Graph-Centered Approach, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2007

Vedoucí: Ing. Radek Beňo

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 3. 2016

Poděkování.

Na tomto místě bych nejprve rád poděkoval svým rodičům a celé rodině za veškerou podporu v mém životě.

Nemalé díky patří vedoucímu práce panu Ing. Radku Beňovi, kterému bych rád tímto poděkoval za nesčetné rady a konzultace, které vedly k úspěšnému dokončení této práce.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Karlu Březinovi za zpřesnění této práce poskytnutím dat z období povodně 2013.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských prací.

V dne

Podpis autora:

Název práce: Řízení systému vodní kaskády

Autor: Václav Novotný

Katedra: Katedra řídicí techniky

Vedoucí disertační práce: Ing. Radek Beňo

Abstrakt: Cílem této práce je vytvoření matematického modelu Vltavské kaskády pro potřeby řízení v režimu objemové regulace v přehradě. Je k tomu využita metoda vazebních grafů, pomocí kterých jsou vytvořeny modely jednotlivých přehrad Vltavské kaskády. Poté je provedena identifikace jednotlivých modelů přehrad Vltavské kaskády pomocí technických parametrů a získaných dat. Na takto získané modely je vytvořen P regulátor, starající se o objemovou regulaci. Dále bylo navrženo distribuované řízení, které se stará o správné nastavení referencí požadovaných objemů pro objemovou regulaci.

Klíčová slova: Vltavská kaskáda, povodňová vlna, matematický model, konzumní křivka, limnigrafické stanice, vodní dílo, vazební graf, řízení, simulace

Title: Water Cascade Control

Author: Václav Novotný

Department: Department of Control Engineering

Supervisor: Ing. Radek Beňo

Abstract: The goal of this thesis is to create a mathematical model of the Vltava cascade, which will be used for controlling the water volume in individual dams. The bond graph method was used to create models of all individual dams. The next step was to identify all models using technical parameters and given data. Then were created P-regulators which control the volume of water in each dam. Distributed control was used to set required water volume in each dam.

Keywords: Vltava cascade, flood wave, mathematical model, consume curve, gauging station, water project, bond graph, control, simulation

Obsah

Seznam tabulek	3
Seznam obrázků	4
Seznam fyzikálních veličin a konstant	6
1 Úvod do problematiky	7
1.1 Povodeň a povodňová vlna	7
1.2 Obecná charakteristika vodních děl	8
1.2.1 Rozdělení vodních nádrží podle účelu	8
1.2.2 Rozdělení prostoru nádrže podle účelu	8
1.2.3 Rozdělení přehrad	9
1.2.4 Společné objekty všech typů přehrad	10
1.3 Vodní elektrárny	10
1.3.1 Hydraulické stroje - Turbíny	10
2 Vltavská kaskáda	12
2.1 Vltava	12
2.2 Vývoj záměrů a studií na využití Vltavy	12
2.3 Vodní díla Vltavské kaskády	13
2.3.1 Vrané	14
2.3.2 Štěchovice	14
2.3.3 Slapy	14
2.3.4 Kamýk	15
2.3.5 Orlík	15
2.3.6 Kořensko	16
2.3.7 Hněvkovice	16
2.3.8 Lipno II	16
2.3.9 Lipno I	17
2.4 Limnigrafické stanice	17
2.4.1 Konzumční křivka	17
2.4.2 Limnigrafické stanice na Vltavě	17
2.5 Technické parametry VD	18
2.5.1 Technické parametry VD horního toku	18
2.5.2 Technické parametry VD dolního toku	18
3 Matematický model přehrady	19
3.1 Předpoklady	19
3.2 Vazební graf	19
3.2.1 Základní prvky a jejich spojení	20
3.2.2 Vytvoření vazebního grafu	20
3.3 Vytvoření rovnic z vazebního grafu	21
3.4 Poddajnost nádrže $f_C(q)$	21
3.4.1 Aproximace tvaru přehrady	22
3.5 Resistance závislá na otevření ventilu u $f_R(u)$	23
3.6 Nelineární model	24
3.7 Parametrizace nelineárního modelu	24

3.7.1	Získání parametrů	25
3.8	Ukázka vyčíslených parametrů pro VD Hněvkovice	28
3.9	Simulace nelineárního modelu	28
3.9.1	Přetečení hladiny	30
3.9.2	Simulace otevírací křivky ventilu	30
3.9.3	Minimální otevření ventilu	30
3.9.4	Bloky zpožďující objem	30
3.9.5	Simulace	31
4	Výpočet časového zpoždění vody	32
4.1	Ukázka výpočtu časového zpoždění vody mezi dvěma limnigrafními stanicemi s přítokem	33
5	Optimalizovaný model přehrady	35
5.1	Ukázka vyčíslených parametrů pro VD Hněvkovice	35
5.2	Simulace nelineárního modelu	35
5.2.1	Simulace	36
6	Návrh řízení Vltavské kaskády	37
6.1	Lineární aproximace modelu	37
6.1.1	Ukázka výpočtu pracovního bodu pro VD Slapy	38
6.2	Návrh řízení v režimu objemové regulace	38
6.2.1	Nalezení parametrů k_p	38
6.2.2	Diskretizace nalezeného regulátoru	38
6.2.3	Příklad nalezení parametru k_p pro VD Slapy	39
6.3	Návrh distribuovaného řízení	39
7	Simulace a řízení Vltavské kaskády za povodňového stavu	40
7.1	Simulace a řízení v režimu objemové regulace	40
7.1.1	Referenční hodnota objemu je totožná s počáteční hodnotou objemu	40
7.1.2	Referenční hodnota objemu je maximální	42
7.2	Simulace a řízení v režimu distribuovaného řízení	44
	Závěr	46
	Seznam použité literatury	48
	A Nákreasy VD Vltavské kaskády	49
	B Simulace funkčnost otevíracích křivek VD	53
	C Simulace matematických modelů VD	57
	D Simulace konzumčních křivek limnigrafů	61
	E Simulace optimalizovaných modelů VD	64
	F Simulace a řízení v režimu objemové regulace	68
F.1	Referenční hodnota je počáteční velikost objemu	68
F.2	Referenční hodnota je maximální velikost objemu	70
	G Příložené CD	73

Seznam tabulek

2.1	Technické parametry VD horního toku	18
2.2	Technické parametry VD dolního toku	18
3.1	Různé fyzikální domény	19
3.2	Ukázka vyčíslených parametrů VD Hněvkovice	28
4.1	Vyčíslených parametrů pro LG Březí	33
4.2	Změna parametrů po přítoku řeky Malše	33
4.3	Vyčíslených parametrů pro LG České Budějovice	33
4.4	Výpočet časového zpoždění vody mezi LG Březí a LG České Budějovice	34
4.5	Změna parametrů po přítoku řeky Malše	34
5.1	Ukázka vyčíslených parametrů VD Hněvkovice	35
6.1	Ukázka výpočtu pracovního bodu pro VD Slapy	38
6.2	Nalezení parametru k_p pro VD Slapy	39

Seznam obrázků

1.1	Povodňová vlna [3]	7
1.2	Rozdělení prostoru nádrže podle účelu [5]	9
2.1	Vltavská kaskáda [13]	13
3.1	Výsledný vazební graf přehrady	21
3.2	Aproximované tvaru přehrady	23
3.3	Povodňová vlna z dat procházející VD Orlík	25
3.4	Závislost R na u pro VD Hněvkovice	26
3.5	Závislost R na Q_{out} pro VD Hněvkovice	27
3.6	Zapojení VD Orlík	29
3.7	Simulace funkčnosti otevírací křivky	30
3.8	Simulace VD Orlík	31
4.1	Ukázka konzumní křivky LG Březí	32
5.1	Zapojení VD Hněvkovice	36
5.2	Simulace VD Hněvkovice	36
7.1	Režim objemové regulace I pro Lipno I	40
7.2	Režim objemové regulace I pro Orlík	41
7.3	Režim objemové regulace I pro Slapy	41
7.4	Režim objemové regulace I pro Vrané	42
7.5	Režim objemové regulace II pro Lipno I	42
7.6	Režim objemové regulace II pro Orlík	43
7.7	Režim objemové regulace II pro Slapy	43
7.8	Režim objemové regulace II pro Vrané	44
7.9	Režim distribuovaného řízení pro Lipno 1, Orlík, Slapy	44
7.10	Režim distribuovaného řízení pro Lipno 2, Hněvkovice, Kořensko, Kamýk, Štěchovice a Vrané	45
A.1	VD Vrané [11]	49
A.2	VD Štěchovice [11]	49
A.3	VD Slapy [11]	50
A.4	VD Kamýk [11]	50
A.5	VD Orlík [11]	51
A.6	VD Kořensko [11]	51
A.7	VD Hněvkovice [11]	52
A.8	VD Lipno I [11]	52
B.1	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Lipno I	53
B.2	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Lipno II	53
B.3	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Hněvkovice	54
B.4	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Kořensko	54
B.5	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Kamýk	55
B.6	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Slapy	55
B.7	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Štěchovice	56
B.8	Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Vrané	56

C.1	Simulace VD Lipno I	57
C.2	Simulace VD Lipno II	57
C.3	Simulace VD Hněvkovice	58
C.4	Simulace VD Kořensko	58
C.5	Simulace VD Kamýk	59
C.6	Simulace VD Slapy	59
C.7	Simulace VD Štěchovice	60
C.8	Simulace VD Vrané	60
D.1	Simulace LG Chlum	61
D.2	Simulace LG Lenora	61
D.3	Simulace LG Soumarský most	62
D.4	Simulace LG Vyšší Brod	62
D.5	Simulace LG Zátoň	63
E.1	Simulace VD Lipno I	64
E.2	Simulace VD Lipno II	64
E.3	Simulace VD Kořensko	65
E.4	Simulace VD Orlík	65
E.5	Simulace VD Kamýk	66
E.6	Simulace VD Slapy	66
E.7	Simulace VD Štěchovice	67
E.8	Simulace VD Vrané	67
F.1	Režim objemové regulace I pro Lipno II	68
F.2	Režim objemové regulace I pro Hněvkovice	68
F.3	Režim objemové regulace I pro Kořensko	69
F.4	Režim objemové regulace I pro Kamýk	69
F.5	Režim objemové regulace I pro Štěchovice	70
F.6	Režim objemové regulace II pro Lipno II	70
F.7	Režim objemové regulace II pro Hněvkovice	71
F.8	Režim objemové regulace II pro Kořensko	71
F.9	Režim objemové regulace II pro Kamýk	72
F.10	Režim objemové regulace II pro Štěchovice	72

Seznam fyzikálních veličin a konstant

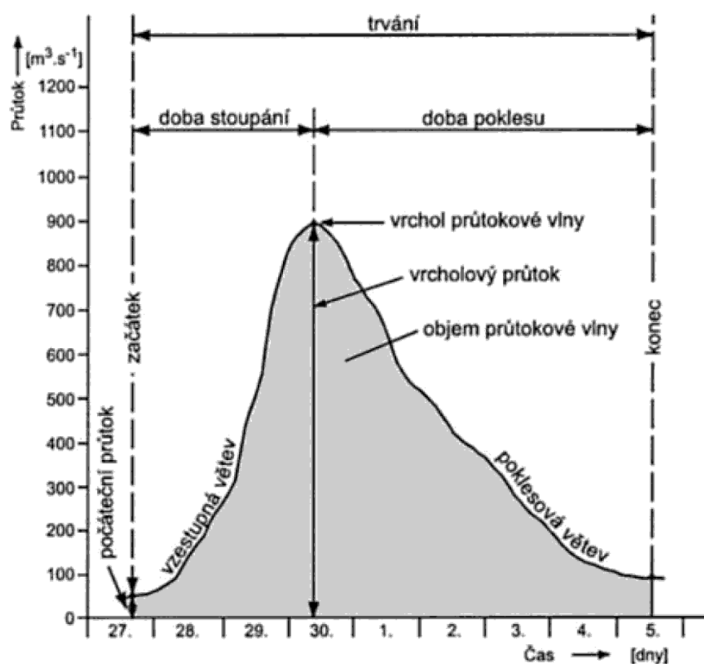
P	..... výkon [W]
E	..... energie [J]
M_k	..... kroutící moment [$N \cdot m$]
ω	..... úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$]
Q	..... objemový průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
p	..... tlak [Pa]
h	..... výška hladiny [mn.m.]
V	..... objem [m^3]
α	..... úhel [°]
d	..... délka [m]
e	..... zobecněná síla [–]
\dot{q}	..... zobecněná rychlost [–]
S_e	..... zdroj zobecněné síly [–]
$S_{\dot{q}}$	..... zdroj zobecněné rychlosti [–]
R	..... zobecněná resistance [–]
T	..... zobecněný transformátor [–]
G	..... zobecněný gyrátor [–]
C	..... zobecněná poddajnost [–]
I	..... zobecněná inertance [–]
q	..... zobecněná pozice [–]
u	..... otevření ventilu [%]
S	..... obsah průtočné plochy [m^2]
v	..... rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
A	..... obsah [m^2]
t	..... čas [s]
ρ_v	..... hustota, $\rho_v = 999,701 [kg \cdot m^{-3}]$
g	..... gravitační zrychlení, $g = 9,81 [m \cdot s^{-2}]$

1. Úvod do problematiky

Při pohledu z vesmíru na planetu Zemi, vypadá jako modrobílá planeta. Bílá od vodních par a modrá od vody, která je nezbytnou součástí všeho živého na zemi. Ta se spolu se sluneční a větrnou energií řadí mezi přirozené obnovitelné zdroje energie, které se z pohledu života člověka zdají býti nevyčerpatelné. Mezi nejstarší využívané obnovitelné zdroje energie patří právě energie vodní. Člověk se ji díky své vynalézavosti naučil využívat nejprve k dopravě při splavování lodí a vorů po proudu řek a později k pohonu různých strojů, mlýnů a pil. Kvůli vzrůstajícím nárokům na vodní dopravu byly vodní trasy často upravovány a zdokonalovány výstavbou nových propustí. Obrat ve vývoji využití vodních toků nastal na začátku 20. století zájmem energetickým, kde začíná převládat názor na zrušení vodních cest a vybudování velkých akumulacích nádrží pro co největší využití vodní energie toku. Tímto ovládnutím vodních toků se nejen na většině místech zamezila vodní doprava, ale zabránilo se i ničivým dopadům povodňových vln. Při správné manipulaci s akumulovanou vodou v nádržích však nádrží plní nejen funkce energetické a ochranné, ale i vodohospodářské, jako je zásobárna pitné vody, nadlepšování průtoků, rybochovná či rekreační činnost. Tím se dostáváme k tématu naší práce a to k vytvoření matematických modelů přehrad a nádrží, kde vhodným řízením dosáhneme zmírnění či k zamezení povodňové vlny.

1.1 Povodeň a povodňová vlna

Povodeň je přechodné zvýšení hladiny vodního toku nad jeho koryto. Po výrazném zvýšení průtoků daným místem následuje po určité době jejich pokles.



Obrázek 1.1: Povodňová vlna [3]

Výrazné zvýšení průtoků může být zapříčiněno jednak nepříznivými klimatickými podmínkami, které povodni předcházejí, ale i lidským faktorem, jako je nedostatečná příprava a včasná nepřipravenost vytvoření záchytných objemových prostor ve vodních dílech,

keré by vzniklou povodňovou vlnu zmírnili či zastavili. Takovým způsobem se vytváří povodňová vlna, která je charakterizována tvarem a maximálním dosaženým průtokem - tzv. kulminací. Území, která jsou při povodni často zaplavena jsou označována jako záplavová území. Tímto vymezením se předchází ke snižování škod [1]. Četnost výskytů kulminačních průtoků se zpracovávají jako n-leté vody. Maximální průtok n-leté povodně je hodnota, které je dosaženo v průměru jednou za n let [2].

1.2 Obecná charakteristika vodních děl

Vodní díla jsou podle platné legislativy §55 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách stavby, které slouží ke vzdouvání a zadržování vod, umělému usměrňování odtokového režimu povrchových vod, k ochraně před škodlivými účinky vod, a to zejména přehrad, jezy a hráze. Umělým přehrazením vodního toku přehradní stavbou vzniká přehradní nádrž. Od přirozených jezer se liší shromažďováním velkého množství vody pro různé vodohospodářské účely, jako je využití vodní energie, zásobárna pitné vody, ochrana proti povodním, rekreaci apod. Obecně vodními nádržemi vyrovnáváme nepravidelné průtoky v řekách, zvyšujeme minimální vodní stavy v řekách a odebíráme nadřazenou vodu v době hospodářské potřeby. Prostor přehradní nádrže je tvořen údolím řeky až po nejvyšší vodní hladinu, která vznikla vzdušným původní hladiny v řece [4]. Pro vodní dílo, které využívá vodní energii je hlavní v dané lokalitě soustředit spád při dostatečném průtoku.

1.2.1 Rozdělení vodních nádrží podle účelu

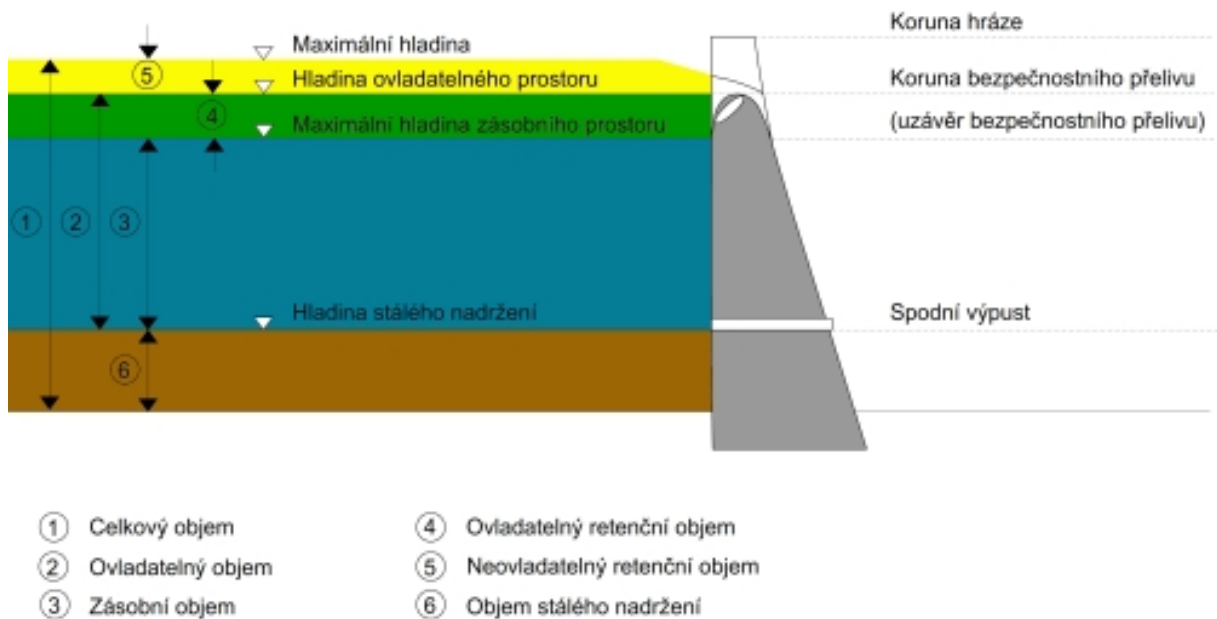
Podle účelu dělíme vodní nádrže na ochranné, zásobní, vyrovnávací a smíšené [4].

- Ochranné nádrže – se budují zpravidla jen na horních tocích řek, kde slouží k zachycení povodní. U víceúčelových ochranných nádrží se pro zadržení povodní vyhrazuje část prostoru, tzv. ochranný prostor. Ten je stále prázdný, až do příchodu povodňové vlny, která tento prostor zaplní. Po opadnutí povodně se ochranný prostor rovnoměrně vypustí tak, aby nádrž byla opět připravena pro zachycení povodní. Jednoúčelové ochranné nádrže, které jsou součástí úpravy toků ve středních a dolních tocích, se nazývají poldery.
- Zásobní nádrže – jsou ve svém prostoru na řece schopné zadržovat přirozené přítoky a regulovat z něj odtoky podle aktuální vodohospodářské potřeby. Tyto nádrže se budují nejčastěji.
- Vyrovnávací nádrže – zachycují proměnlivé přítoky z nádrží se špičkovými elektrárnami do svého zásobního prostoru a vypouštějí vyrovnaný odtok.
- Víceúčelové nádrže – mají smíšený účel. Ze svého zásobního prostoru slouží pro např. energetiku (jako hlavní účel), plavbu, zemědělství či rekreaci. A kromě toho mají část svého prostoru vyhrazen na zachycení kulminačních průtoků povodňových vln.

1.2.2 Rozdělení prostoru nádrže podle účelu

Prostor nádrže mezi dnem a nejvyšší vodní hladinou nazýváme celkovým objemem nádrže V . U velkých vodních nádrží, které slouží více vodohospodářským účelům, rozeznáváme tři hlavní prostory [4].

1. Hladina stálého nadržení – je omezena dolní hranicí hladiny zásobního prostoru a dnem nádrže.
2. Hladina zásobního prostoru – je omezena horní a dolní hladinou zásobního prostoru. Zásobní prostor slouží pro akumulování vody pro různé vodohospodářské účely.
3. Maximální retenční hladina – je omezena nejvyšší vodní hladinou v nádrži a horní hladinou zásobního prostoru. Slouží k částečnému zadržení velkých vod a snížení škodlivých kulminačních průtoků povodňových vln.



Obrázek 1.2: Rozdělení prostoru nádrže podle účelu [5]

1.2.3 Rozdělení přehrad

Vzdouvací objekty dělíme na přehrady a na jezy [4].

- Jez – je vodní dílo v korytě toku, které v něm trvale, nebo dočasně vzdouvá (navyšuje) vodu řeky k různým vodohospodářským účelům, například pro zlepšení splavnosti vodních toků nebo vytváření spádů pro energetické účely. Jezy se dělí na:
 1. Pevné – tj. zděné, kamenné, a betonové jezy.
 2. Pohyblivé – tj. stavidlové, klapkové, segmentové, válcové a vakové jezy.
- Přehrada – je vodní dílo v korytě toku, které v něm trvale vzdouvá (navyšuje) vodu řeky k různým vodohospodářským a jiným účelům v nádrži nad přehradou. Hlavní rozdíl oproti jezům je ten, že přehrady vytváří údolní nádrže s velkým objemem, kdežto jez vytváří jezovou zdrž s objemem výrazně menším. Přehrady se dělí na:
 1. Přehrady z místních materiálů – tj. zemní, kamenité a smíšené přehrady.
 2. Přehrady ze vzdálených materiálů – tj. betonové, zděné, ocelové a dřevěné přehrady.
 3. Podle konstrukčního a statického uspořádání – tj. gravitační (tížné - přímé, duté, pilířové přehradní zdi), klenbové (jedno a více obloukové), členěné (deskové, klenbové, kopulovité) a smíšené přehrady.

1.2.4 Společné objekty všech typů přehrad

Společné objekty všech typů přehrad jsou spodní výpusti, vývary a přelivy. Spodními výpustmi se částečně nebo úplně vyprazdňuje vodní nádrž, musí proto být na nejhlubším místě přehrady buď v těle, nebo mimo jako odtoková vodní štola. Vývar pod přehradou je zpevněná část koryta sloužící k utlumení energie vody vytékající z nádrže ze spodních výpustí či z přelivů. Mezi nejdůležitější objekty přehrady patří přelivy, které slouží k rychlému odvedení povodňových průtoků. Přelivy se dimenzují na nejnepříznivější předpoklad, že do plné nádrže přiteče náhle povodeň, jejíž průtok dosahuje maximálního průtoku, který se může v přehradním místě vyskytnout.

1.3 Vodní elektrárny

Voda, která přitéká přírodním kanálem, roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s generátorem elektrické energie. Turbína spolu s generátorem tvoří tzv. turbogenerátor. Mechanická energie proudící vody se tak mění na základě elektromagnetické indukce (v otáčející se smyčce elektrického vodiče v magnetickém poli se indukují střídavé elektrické napětí) na energii elektrickou. Ta se transformuje a odvádí rozvodnou sítí do míst spotřeby [6].

1. Podle velikosti instalovaného výkonu – tj. velké (s výkonem nad 200MW), střední (s výkonem od 10MW do 200MW) a malé (s výkonem do 10MW) elektrárny
2. Podle způsobu soustředění vodní energie a přívodu vody k turbíně – tj. přehradové (spád vytvořen přehradou), zdržové (jezové - spád vytvořen jezem) a derivační (umělé vedení vody mimo vodní tok) elektrárny
3. Podle velikosti využívaného spádu – tj. nízkotlaké (spád do 20m), středotlaké (spád od 20m do 100m) a vysokotlaké (spád od 100m) elektrárny
4. Podle charakteru pracovního režimu – tj. průtočné (výrazně neovlivňují přirozený průtok toku) a špičkové (řízený odběr vody z akumulací nádrže podle aktuální potřeby elektrické energie – špičková elektrická energie) elektrárny
5. Podle umístění a uspořádání strojovny – tj. kryté (s budovou strojovny), nekryté (bez budovou strojovny), polokryté (s minimální výškou strojovny) a přelévané (strojovna pod přelivy jezu nebo hráze) elektrárny
6. Podle provozovatele a zapojení
7. Přečerpávací vodní elektrárny PVE – tj. druh špičkové elektrárny, které pracují s dvěma vodními nádržemi - horní a dolní. V době, kdy je spotřeba elektrické energie nízká (např. v noci), pracuje PVE v čerpadlovém režimu a elektrina je spotřebována na čerpání vody tlakovými ocelovými přivaděči z dolní nádrže do horní nádrže. Tam je voda uložena, dokud spotřeba elektrické energie nevzroste, obvykle v období špičkového zatížení elektrizační soustavy [7].

1.3.1 Hydraulické stroje - Turbíny

Nejvýznamnějším strojním zařízením vodní elektrárny je turbína. Pracovním médiem těchto strojů je kapalina. Turbína umožňuje přeměnu hydraulické energie E (kapalina) na energii mechanickou E_m (hřídel), která vystupuje ve formě energie rotační $M_k \cdot \omega$, kde

M_k je kroutící moment na hřídeli stroje a ω je úhlová rychlost oběžného kola stroje. K přeměně energie mechanické v elektrickou slouží ve vodních elektrárnách elektrický točivý stroj - generátor. Nositelkou hydraulické energie je pracovní kapalina - voda. Hydraulická energie má dvě modifikace. Potenciální energii (tlaková, polohová) a kinetickou energii (rychlostní, pohybová). Mírou energetického obsahu kapaliny je její měrná energie, která je definována jako energie vztažená na jednotku hmotnosti kapaliny. Tedy celkovou měrnou energii kapaliny E_c můžeme napsat jako

$$E_c = E_p + E_h + E_k, \quad (1.1)$$

tedy součet tlakové měrné energie E_p , polohové měrné energie E_h a kinetické měrné energie E_k . Mezi hlavní parametry turbín patří průtok turbínou Q a měrná energie turbíny E (užitečný spád) [8].

- Průtok turbínou je množství vody protékající turbínou za jednotku času, ve kterém je zahrnut i průtok vody, který protéká mezerami mezi rotorem a statorem (nebo jako chlazení) a není energeticky využit.
- Měrná energie turbíny je dána rozdílem celkových měrných energií kapaliny ve vstupním a výstupním průřezu stroje.
- Podle způsobu přenosu energie se vodní turbíny dělí na přetlakové a rovnotlaké. V přívodu vody dochází buď k částečné (přetlakové) nebo úplné (rovnotlaké) přeměně tlakové měrné energie kapaliny E_p na kinetickou měrnou energii kapaliny E_k .
- Mezi přidružené parametry patří: otáčky turbíny, výkon turbíny, účinnost turbíny.

Podle způsobu přenosu energie se vodní turbíny dělí na přetlakové a rovnotlaké. V přívodu vody dochází buď k částečné (přetlakové) nebo úplné (rovnotlaké) přeměně tlakové měrné energie kapaliny E_p na kinetickou měrnou energii kapaliny E_k .

1. Kaplanova turbína – jedná se o přetlakovou, axiální turbínu (voda protéká mezi lopatkami oběžného kola ve směru jejich osy). Určena pro spády 2 až 80 metrů.
2. Francisova turbína – jedná se o přetlakovou, radiálně axiální turbínu (oběžným kolem turbíny voda nejprve proudí kolmo na osu a po přiblížení k ose mění směr na osový). Určena pro spády 40 až 400 metrů.
3. Peltonova turbína – jedná se o rovnotlakou, tangenciální turbínu (oběžným kolem turbíny voda proudí tečně vysokou rychlostí). Určena pro spády 400 až 1000 metrů, nejvýhodnější pro malé průtoky.

2. Vltavská kaskáda

Vltavská kaskáda je soustava devíti vodních děl (viz kap. 2.3) rozprostřených na řece Vltavě v úseku delším než 250 km. Stavba je důsledkem průmyslové revoluce, kde hlavním podnětem výstavby největších děl kaskády bylo využití vodní energie. Dalšími účely Vltavské kaskády jsou zajištění minimálního odtoku, snížení povodňových průtoků, dodávky povrchových vod, nadlepšování průtoků pro plavbu a další. Všechny elektrárny jsou majetkem firmy ČEZ. Jejich provoz je zautomatizován a je řízen prostřednictvím centrálního dispečinku ve Štěchovicích. Samotná vodní díla spravuje Povodí Vltavy, které je státním podnikem.

2.1 Vltava

Místo, které geograficky označujeme za prameniště Vltavy, leží na východním úbočí Černé hory u Kvildy na Šumavě v nadmořské výšce 1172m. Na dráze toku do Prahy přijímá Vltava mimo četných menších vodních toků také řeky Malší, Lužnici, Otavu, Sázavu a Berounku. Délka Vltavy od prameniště k soutoku s Labem je 436 km a její celková plocha je 28 090 km².

První snahy o úpravu Vltavy ke zlepšení splavnosti pro lodě a vory si vyžádaly mapové znázornění jejího toku. První polohopisná mapa Vltavy byla vypracována P. Kryšpínem, opatem Strahovského kláštera, již v letech 1600 – 1623, mapa však nebyla vyhotovena z měřických podkladů. Po sérii nevyhovujících mapových podkladů bylo v letech 1878 – 1887 provedeno nové měření v měřítku 1:2880. Mimo vlastní tok Vltavy bylo polohopisně zaměřeno i území podél řeky, včetně navigačních staveb, a byla zjištěna výška hladiny. Byla provedena kilometráž osy řečiště od ústí Malše v Českých Budějovicích k zaústění Vltavy do Labe u Mělníka s vyznačením terénu [9].

2.2 Vývoj záměrů a studií na využití Vltavy

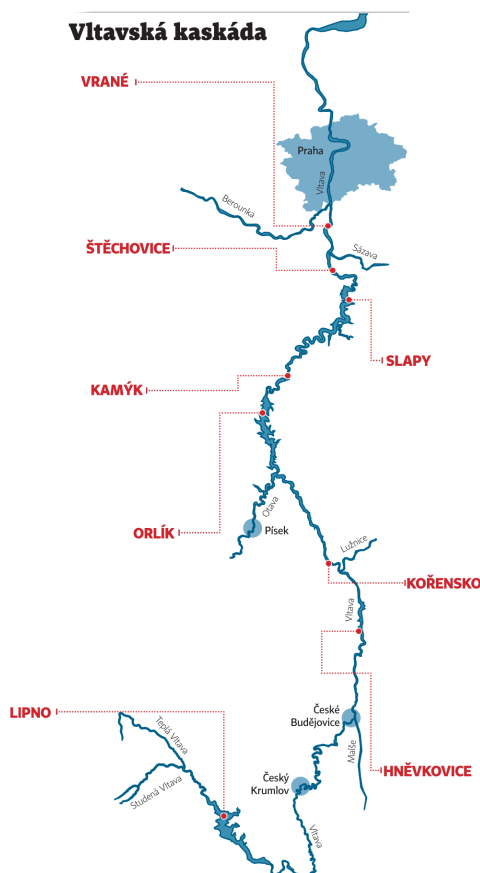
Využívání řeky Vltavy se v historických dobách soustředilo hlavně na její střední tok, tedy tok od Českých Budějovic do Prahy, který představuje úsek mohutnění řeky přijímáním největších přítoků, řek Malše, Lužnice, Otavy, Sázavy a Berounky. Kvůli špatným plavebním podmínkám, které byly zapříčiněny mělčinami a skalisky, byly jako první dálková plavidla použity vory. První zprávy o lodní dopravě máme z poloviny 15. století. Většího rozmachu dosáhla v 16. století, kdy se začala po Vltavě dopravovat sůl z Rakouska. Protože vzrůstající nároky na udržení splavnosti Vltavy přesahovaly technickou úroveň, byly v letech 1775 – 1778 zřízeny nové propustě a zdokonaleny potahové stezky pro lodě tažené koňmi. Teprve do dalšího rozvoje lodní dopravy konkurenčně nepříznivě zasáhlo vybudování železnice z Českých Budějovic do Prahy. Teprve koncem 19. století došlo na opětovné ožívání lodní dopravy přepravou šterkopísku, kamene a kvádrů z povltavských lomů. Obrat ve vývoji a řešení středovltavských úprav nastal po první světové válce, střetávají se dva hlavní hospodářské zájmy. Zájem plavby a nový zájem energetický. Již roku 1911 byl vypracován návrh na úplné zrušení vodní plavby na Vltavě a vytvoření velkých akumuláčních prostor pro zlepšení průtoků a pro co nejvyšší využití vodní energie. Neboť v té době byl vypracován první katastr vodních sil, podle kterého bylo zjištěno, že řeka Vltava má výborné předpoklady pro využití vodní energie [9].

2.3 Vodní díla Vtavské kaskády

U vodních děl jsou změřeny výšky hladin vody v nádrži, výšky hladin vody pod vodním dílem a přítok. Z naměřených hodnot je získán odtok a objem.

- Pro sledování výšky hladiny vody v nádrži a pod vodním dílem slouží limnigrafické stanice s dálkovým přenosem do centrálního dispečinku, odkud jsou ovládány spodní výpusti a přelivová pole. Tyto limnigrafické stanice bývají často umístěny přímo v hrázovém bloku.
- Pro sledování přítoku do nádrže složí limnigrafické stanice.
- Pro sledování odtoku z nádrže slouží zařízení ke stanovení výšky hladiny vody v nádrži a pod vodním dílem a měrné konzumční křivky s číselným vyjádřením průtoku.
- Bylo zjištěno, že charakteristiku vodní nádrže určuje tzv. křivka vodních obsahů [4], která znázorňuje závislost celkového objemu nádrže na výšce hladiny vody v nádrži $V=f(h)$. Tato závislost je kvadratická. Tyto poznatky později použijeme pro návrh optimalizovaného modelu (viz kap. 5), kde využijeme výpočet hladiny vody z objemu vody v nádrži.

Následuje soupis VD Vltavské kaskády, informace lze nalézt v [10], [11]. Nákresy VD lze nalézt v příloze A.



Obrázek 2.1: Vltavská kaskáda [13]

2.3.1 Vrané

Vodní dílo Vrané bylo uvažováno ve všech variantách řešení kaskády již od roku 1911. VD Vrané je prvním a nejstarším stupněm Vltavské kaskády. Přípravné práce byly zahájeny koncem roku 1930 a byly ukončeny v roce 1935. VD Vrané má 4 hlavní objekty: jez, 2 plavební komory a elektrárnu.

- Stavební konstrukci jezu tvoří betonový práh obložený žulovými kvádry se čtyřmi přelivy. Nachází se ve střední části údolí. Ovládací mechanismy jsou umístěny na mostovce na dělicích pilířích.
- Plavební komory jsou betonové s kamennými obklady. Nachází se při levém břehu. Menší komora je přiřazena bočně k velké komoře, která je umístěna přímo u levého břehu.
- Průtočná elektrárna je umístěna na pravém břehu, kde je osazena dvěma Kaplanovými turbínami.
- Dnes je hlavním účelem vodního díla Vrané vyrovnávání odtoků ze špičkové elektrárny Slapy a Štěchovice a jejich využití v průtočné elektrárně.

2.3.2 Štěchovice

Vodní dílo Štěchovice je druhým stupněm Vltavské kaskády. Její výstavba probíhala v období druhé světové války a to v letech 1938 – 1944. Vodní dílo má 3 hlavní objekty: přehradu, plavební komoru a středotlakovou elektrárnu. K těmto částem byla přičleněna během stavby ještě elektrárna vysokotlaká.

- Přehrada je z pevného, betonového tělesa s pěti přelivy. Ovládací mechanismy jsou umístěny na mostovce na dělicích pilířích. Pod středním polem je otvor pro možnost úplného vypuštění nádrže.
- Plavební zařízení je umístěno u pravého břehu. Rozdíl hladin horní a dolní hladiny je 20 metrů.
- Středotlaká průtočná vodní elektrárna je umístěna u levého břehu, kde pracují dvě Kaplanovy turbíny.
- Vysokotlaká přečerpávající vodní elektrárna je osazena jednou reverzní Francisovou turbínou (zapojení turbíny jako pumpy). S umělou horní nádrží na kopci Homole a se spádem 220 m byla uvedena do provozu v roce 1947.
- Dnes je hlavním účelem Štěchovického vodního díla vyrovnávání odtoků ze špičkových vodních elektráren Slapy a Orlík a jejich následné energetické využití. Spolu s vodním dílem Vrané vyrovnává odtok z Vltavské kaskády.

2.3.3 Slapy

Vodní dílo Slapy je třetím stupněm Vltavské kaskády. Je po Lipnu I a Orlíku třetí největší přehradou Vltavské kaskády. Její výstavba probíhala v letech 1949 – 1955. Vodní dílo má 3 hlavní objekty: přehradu, plavební zařízení a elektrárnu.

- Přehradním tělesem je betonová, přímá hráz se čtyřmi přelivovými poli, pod kterými je v tělese hráze umístěna strojná elektrárna.

- Z finančních důvodů a pro časovou tíseň při stavbě nebylo realizováno navržené plavební zařízení pro přepravu lodí. Na jeho dokončení se zpracovávala řada studií, i v současných dnech.
- Špičková vodní elektrárna je přetékaná (při nutnosti voda proudí přímo nad elektrárnou). Je složena ze tří Kaplanových turbín, na které je přiváděna voda potrubím ve hrázi pomocí tří ocelových přivaděčů. Na plný výkon je schopna přejít za 136 vteřin.
- Dnes je hlavním účelem vodního díla Slapy využití průtoku a spádu řeky k výrobě špičkové elektrické energie pro řízení výkonové bilance české elektrizační soustavy. Také umožňuje dlouhodobou regulaci výšky hladiny Vltavy, současně je hojně využívána k letní rekreaci.

2.3.4 Kamýk

Vodní dílo Kamýk je čtvrtým stupněm Vltavské kaskády. Její výstavba probíhala v letech 1957 – 1962. Vodní dílo má 3 hlavní objekty: přehradu, plavební zařízení a elektrárnu.

- Přehradním tělesem je betonová, gravitační, přímá hráz se čtyřmi přelivovými poli
- Zařízení pro přepravu lodí je umístěno při pravém břehu. Vedle něho je umístěno zařízení na přepravu sportovních lodí pomocí kolejové dráhy.
- Kamýk slouží zejména k vyrovnání kolísavého odtoku ze špičkové elektrárny Orlík, ale současně je využíván k výrobě elektrické energie. V případě výpadku také elektrárna dokáže zajistit vlastní spotřebu vodního díla Orlík.
- Průtočná vodní elektrárna je umístěna při levém břehu a je osazena čtyřmi Kaplanovými turbinami. Pracuje v tandemu s vodní elektrárnou Orlík.

2.3.5 Orlík

Vodní dílo Orlík je pátým stupněm Vltavské kaskády. Orlík je největší vodní dílo v České republice i nejvýznamnější článek Vltavské kaskády. Spolu s vodním dílem Lipno I rozhodují o víceletém řízení průtoku na Vltavě i na dolním Laby. Jeho výstavba probíhala v letech 1954 – 1961. Vodní dílo má 3 hlavní objekty: přehradu, plavební zařízení a elektrárnu.

- Přehradním tělesem je betonová, přímá hráz s třemi přelivovými poli a dvěma spodními výpusti.
- Při pravém břehu je umístěno zařízení pro přepravu lodí - šikmý lodní výtah. Pro přepravu sportovních lodí slouží plošinový dopravní vůz.
- Špičková vodní elektrárna je nepřetékaná a je umístěna u paty betonové hráze v levé údolní části. Elektrárna je osazena čtyřmi Kaplanovými turbinami. Na plný výkon je schopna přejít za 128 vteřin.
- Vodní dílo Orlík pracuje ve vzájemné spolupráci s vodním dílem Kamýk. Vodní elektrárna Orlík se významně podílí na řízení celostátní energetické soustavy a na výrobě levné, ekologicky čisté, špičkové elektrické energie. Také je oblíbeným místem k rekreaci.

2.3.6 Kořensko

Vodní dílo Kořensko je šestým stupněm Vltavské kaskády. Kořensko je společně s vodním dílem Hněvkovice nejmladší z částí Vltavské kaskády. Vodní dílo Kořensko bylo vybudováno za účelem stabilizace hladiny vody v Týně nad Vltavou. Ale i v souvislosti s jadernou elektrárnou Temelín, ze které je vypouštěna odpadní voda, která je energeticky využita v průtočné elektrárně. Jeho výstavba probíhala v letech 1986 až 1992. Vodní dílo má 3 hlavní objekty: přehradu, plavební zařízení a elektrárnu.

- Přehradním tělesem je pohyblivý jez se čtyřmi přelivovými poli.
- Při levém břehu je umístěno zařízení pro přepravu lodí.
- Průtočná nízkotlaková elektrárna je umístěna mezi plavebním zařízením a jezem, kde je osazena dvěma Kaplanovými turbínami.
- Hlavní funkcí vodního díla Kořensko je udržovat stálou hladinu, a tím odstranit hygienické a estetické závady v městské aglomeraci Týna nad Vltavou, které byly způsobené kolísáním hladiny zdrže Orlík.

2.3.7 Hněvkovice

Vodní dílo Hněvkovice je sedmým stupněm Vltavské kaskády. Hněvkovice byly vybudovány v souvislosti s výstavbou jaderné elektrárny Temelín, především jako rezervoár technologické vody. Výstavba vodního díla probíhala v letech 1986 – 1992. Vodní dílo má 4 hlavní objekty: přehradu, plavební zařízení, elektrárnu a čerpací stanici.

- Přehradní těleso tvoří betonová, gravitační hráz se třemi přelivovými poli.
- Při pravém břehu je umístěno zařízení pro přepravu lodí.
- Průtočná vodní elektrárna je umístěna u levého břehu s dvěma Kaplanovými turbínami.
- Pro účel dodávání vody do jaderné elektrárny Temelín byla vybudována čerpací stanice včetně přívodního potrubí, která byla umístěna v těsné blízkosti hráze na levém břehu.

2.3.8 Lipno II

Vodní dílo Lipno II je osmým stupněm Vltavské kaskády. Lipno II bylo vybudováno souběžně s vodním dílem Lipno I v letech 1952 až 1959. Jeho hlavním úkolem je pojmout odtoky ze špičkové vodní elektrárny Lipno I a následně plynulé odpouštění vody dále. Vodní dílo má 2 hlavní objekty: přehradu a elektrárnu.

- Přehradní těleso tvoří z jedné čtvrtiny betonová gravitační hráz a zbylé tři čtvrtiny tvoří sypaná zemní hráz. V betonové části jsou umístěny dvě výpusti a nad nimi dvě přelivová pole.
- Elektrárna na vodním díle Lipno II je průtočná a je vybavena jednou Kaplanovou turbínou.

2.3.9 Lipno I

Vodní dílo Lipno I je devátý a posledním stupněm Vltavské kaskády. Lipno I bylo vybudováno na jihozápadě jižních Čech v letech 1952 až 1959. Vodní dílo má 2 hlavní objekty: přehradu a elektrárnu.

- Přehradní těleso tvoří z jedné třetiny betonová gravitační hráz a zbylé dvě třetiny tvoří sypaná zemní hráz. V betonové části jsou umístěny dvě výpusti a nad nimi dvě přelivová pole.
- Špičková vodní elektrárna se nachází v podzemní kaverně (uměle vytvořený prostor pod zemí sloužící k umístění zařízení podzemní vodní elektrárny), která je umístěna v hloubce 160 m pod terénem. Je vybavena dvěma Francisovými turbínami. Voda je přiváděna na turbíny dvěma ocelovými šachtami a odváděna je podzemním odpadním tunelem. K dopravě technologického zařízení a personálu do podzemí slouží šikmý tunel se sklonem 45°, který je dlouhý 200 metrů. Na plný výkon je schopna přejít do 150 vteřin.
- Energetický význam elektrárny Lipno I představuje výroba levné, ekologicky čisté, špičkové elektrické energie a využití pro regulaci výkonu celostátní energetické soustavy. Kolísání odtoků vyrovnává průtočná vodní elektrárna Lipno 2.

2.4 Limnigrafické stanice

Pro systematické měření vodních stavů jsou používány limnigrafické stanice, které jsou vybaveny limnigrafem s elektronickým záznamem a dálkovým přenosem dat. Pro měření průtoku vodního toku bez měření rychlosti se používá znalost konzumční křivky, která udává závislost průtoku na vodním stavu - výšce hladiny. Podmínkou správného vyčíslení průtoku je stálost koryta, v praxi je nutné konzumční křivku pravidelně obnovovat [12].

2.4.1 Konzumční křivka

Konzumční křivka v hydrologii znázorňuje závislost průtoku na vodním stavu na určitém místě vodního toku – tzv. na určitém měrném profilu vodního toku. Takto získaná závislost je proložena regresní křivkou (spojnicí trendu), která představuje konzumční křivku. Pomocí ní lze zpětně k danému vodnímu stavu přiřadit průtok vodního toku a naopak.

2.4.2 Limnigrafické stanice na Vltavě

Na vodním toku Vltavy, u přítoků před vtokem do Vltavy, za jednotlivými VD Vltavské kaskády se nacházejí limnigrafické stanice, pomocí kterých jsou zaznamenávány hodnoty vodního stavu a jim odpovídající průtok vodního toku pomocí konzumčních křivek.

2.5 Technické parametry VD

Technické parametry byly získány z Povodí Vltavy [11], pro horní tok Vltavy a dolní tok Vltavy.

2.5.1 Technické parametry VD horního toku

	Lipno 1	Lipno 2	Hněvkovice	Kořensko
Maximální kóta hladiny [m n.m.]	725,6	563,35	370,1	352,6
Celkový objem [$10^6 \cdot \text{m}^3$]	309,5	1,685	21,1	2,8
Dno nádrže [m n.m.]	704,82	552,61	355,1	343,35
Délka jezu [m]	296	224	191	89
Maximální výška hladiny [m]	25	19,5	15	9,25
Říční kilometr [km]	329,543	319,12	210,39	200,405
Průměrný roční průtok Q_a [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	13,16	13,4	30,6	54,9
Minimální průtok Q_{min} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	1,5	6	6,5	9,5
Zatopená plocha [ha]	4870	32,5	276,7	88,87

Tabulka 2.1: Technické parametry VD horního toku

2.5.2 Technické parametry VD dolního toku

	Orlík	Kamýk	Slapy	Štěchovice	Vrané
Maximální kóta hladiny [m n.m.]	353,6	284,6	270,6	219,4	200,10
Celkový objem [$10^6 \cdot \text{m}^3$]	716,5	12,98	269,3	10,4	11,1
Dno nádrže [m n.m.]	273,56	270,1	214,6	196,5	190,4
Délka jezu [m]	450	158	260	124	96,8
Maximální výška hladiny [m]	80,03	14,5	56	22,9	9,7
Říční kilometr [km]	144,65	134,73	91,61	84,318	71,325
Průměrný roční průtok Q_a [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	83,5	83,7	85,2	85,6	111
Minimální průtok Q_{min} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	20	25	30	35	40
Zatopená plocha [ha]	2732,7	195	1162,6	95,7	263

Tabulka 2.2: Technické parametry VD dolního toku

3. Matematický model přehrady

Tato část popisuje modelování dynamického systému, jejímž výsledkem je nelineární matematický model ve formě stavových diferenciálních rovnic s obecnými parametry. Tyto rovnice svazují fyzikální veličiny a proměnné, které jsou pro model důležité. Pro získání takového modelu byl zvolen grafický modelovací přístup, metoda vazebních grafů.

3.1 Předpoklady

Předpokládáme, že dynamika turbín a potrubí je oproti dynamice přehrady tak rychlá, že si je můžeme dovolit zanedbat. Z kapitoly (2.3) víme, že limnigrafická stanice pro měření výšky hladiny vody v nádrži je umístěna přímo v těle přehrady, z tohoto důvodu lze model zjednodušit zanedbáním dynamiky vody. Tedy když část vody odteče, okamžitě se její ztráta projeví na výšce hladiny v nádrži. Jelikož získaná data (viz kap. 3.7) jsou vzorkována po 10 minutách a VD jsou schopna přejít do plného výkonu v rozmezí 2 – 3 minut (čas potřebný pro maximální otevření ventilu), zanedbáváme dynamiku ventilů. Například VD Orlík (viz kap. 2.3.5) je schopno přejít na plný výkon za 128 vteřin, VD Slapy (viz kap. 2.3.3) za 136 vteřin apod. Z výše uvedených poznatků předpokládáme, že za vzorkovací periodu 10 minut se ventil dokáže s dostatečnou časovou rezervou plně otevřít/zavřít. Budeme tedy modelovat pouze nádrž, jako akumulátor potenciální energie v podobě sloupce vody a ventily uzavírající odtok odpouštěné vody z nádrže. Důležitější, než-li zkoumání jednotlivých VD, je zkoumání Vltavské kaskády jako celku. Dále předpokládáme, že voda se chová jako ideální kapalina, je tedy dokonale nestlačitelná a bez vnitřního tření.

3.2 Vazební graf

Grafická metoda vazebních grafů je metoda pro vytváření matematických modelů. Klíčovým konceptem této metody je výměna energie neboli výkonová vazba, která představuje výkonový tok mezi dvěma prvky systému. Výhoda výkonové vazby spočívá v tom, že ji můžeme nalézt v nejrůznějších fyzikálních doménách. Ať už se jedná o systémy elektrické, mechanické, hydraulické, teplotní či jejich spojení, můžeme vyjádřit výkon jako součin zobecněné síly a zobecněné rychlosti.

$$P = e \cdot \dot{q} \tag{3.1}$$

kde P je výkonový tok mezi dvěma prvky systému, e je zobecněná síla a \dot{q} je zobecněná rychlost. Klíčovým konceptem, který nám umožňuje přecházet mezi různými fyzikálními doménami jsou analogie mezi doménami [14].

Doména	zobecněná síla e	zobecněná rychlost \dot{q}
Mechanická rotační	T [Nm]	ω [rad · s ⁻¹]
Mechanická translační	F [N]	v [m · s ⁻¹]
Elektrická	u [V]	i [A]
Hydraulická	p [Pa]	Q [m ³ · s ⁻¹]

Tabulka 3.1: Různé fyzikální domény

3.2.1 Základní prvky a jejich spojení

Mezi základní prvky, pomocí kterých jsou tvořeny složitější modely, patří:

1. Zobecněné zdroje S – prvky, které energii vytvářejí. Rozlišujeme zdroj zobecněné síly S_e a zdroj zobecněné rychlosti $S_{\dot{q}}$. V našem případě zdroje zobecněné síly $S_{\dot{q}_{in}}$ a $S_{\dot{q}_{out}}$ představují přítok a odtok přehrady.
2. Zobecněné resistance R – prvky, které energii spotřebovávají. V našem případě resistance R představuje odpor potrubí, turbíny a ventilu, přes které odtéká voda z přehrady.
3. Ideální stroje – prvky, které energii netvoří, nespotebovávají ani neuchovávají, ale mění jejich formu. Rozlišujeme zobecněný transformátor T a zobecněný gyrátor G .
4. Zobecněné poddajnosti C – prvky akumulující energii, která je úměrná zobecněnému vychýlení. V našem případě představuje nádrž VD .
5. Zobecněné setrvačnosti I – prvky akumulující energii, která je úměrná zobecněné hybnosti. V našem případě nebyla uvažována (viz kap. 3.1).

Pro spojení těchto prvků slouží spoje typu 0 a spoje typu 1.

- Spoj typu 0 je charakterizován tím, že na všech zúčastněných vazbách je stejná zobecněná síla e a různá zobecněná rychlost \dot{q} .
- Spoj typu 1 je charakterizován tím, že na všech zúčastněných vazbách je stejná zobecněná rychlost \dot{q} a různá zobecněná síla e .

3.2.2 Vytvoření vazebního grafu

Jelikož se jedná o hydraulický systém, tak pro vytvoření vazebního grafu přehrady byla nejprve vybrána taková místa, ve kterých se zachovává zobecněná síla e - tedy spoj typu 0. Poté byla vybrána místa, ve kterých se zachovává zobecněná rychlost \dot{q} - tedy spoj typu 1. Tato místa představují uzly ve vazebním grafu. Dále byly zvoleny zobecněné zdroje rychlosti $S_{\dot{q}_{in}}$ a $S_{\dot{q}_{out}}$, které představují přítok a odtok vody z přehrady. Ty byly navázány na spoj typu 0 a spoj typu 1. Poté byl přidán prvek zobecněné poddajnosti C , který představuje potenciální energii dočasně akumulovanou ve formě naakumulované vody. Ten byl navázán na spoj typu 0. Jelikož se jedná o nelineární prvek závislý na zobecněné pozici q , je označen $f_C(q)$. Nakonec byl přidán prvek zobecněné resistance R , který představuje resistanci pro ventil. Jelikož se opět jedná o nelineární prvek závislý na otevření ventilu u , je označen $f_R(u)$. Ten byl navázán na spoj typu 1.

Poté bylo nutné do vazebního grafu přidat poloviční šipky a kauzální značky.

- Interpretace poloviční šipky:

$$A \xrightarrow[\dot{q}]{e} B$$

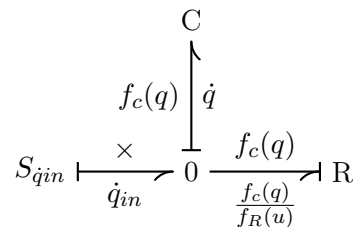
Jestliže je zobecněná síla e a zobecněná rychlost \dot{q} kladná, poté výkonový tok teče ve směru poloviční šipky, tedy z A do B . Jestliže je zobecněná síla e kladná a zobecněná rychlost \dot{q} záporná, tak výkonový tok teče ve směru poloviční šipky, ale

je záporný. Neboli z B do A teče kladný výkonový tok. Poté je nutné vyznačit ve vazebním grafu kauzalitu ve smyslu určení co je vstupem a co je výstupem. Slouží pro snadnější získání diferenciálních rovnic modelu z hotového vazebního grafu. Určení provádíme pomocí tzv. kauzální značky, tedy krátké vertikální čáry, kterou umístíme vždy pouze na jednu stranu výkonové vazby.

- Interpretace kauzální značky:

$$A \xrightarrow[\dot{q}]{} B$$

Pokud je značka umístěna na pravé straně vazby znamená to, že na pravé straně vazby je jako vstup stanovena zobecněná síla e . Tedy vstupem do systému B je zobecněná síla e . Tam, kde není umístěna kauzální značka, tam je jako vstup stanovena zobecněná rychlost \dot{q} . Tedy vstupem do systému A je zobecněná rychlost \dot{q} . Kauzální značku umístíme tak, abychom získali integrální kauzalitu [14]. Výsledný vazební graf je na obr. 3.1.



Obrázek 3.1: Výsledný vazební graf přehrady

3.3 Vytvoření rovnic z vazebního grafu

Jelikož každá vazba vazebního grafu byla popsána zobecněnou silou e a zobecněnou rychlostí \dot{q} , dokážeme každý uzel popsat rovnicemi popisující spoj typu 0 nebo spoj typu 1. Tím získáme 1 diferenciální rovnici popisující dynamické chování našeho modelu.

$$\dot{q} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} = \dot{q}_{in} - \frac{f_C(q)}{f_R(u)}, \quad (3.2)$$

kde \dot{q} je zobecněná rychlost, \dot{q}_{in} je přítok, \dot{q}_{out} je odtok, $f_C(q)$ je závislost zobecněné poddajnosti na zobecněné pozici a $f_R(u)$ je závislost zobecněné resistance na otevření ventilu u .

3.4 Poddajnost nádrže $f_C(q)$

Zobecněná poddajnost C je prvek, který dokáže nejen energii akumulovat, ale i vrátit. Jestliže tento prvek je akumulátor energie, tak energie v něm akumulovaná je úměrná zobecněnému vychýlení q . Pro lineární zobecněnou poddajnost C platí, že

$$e = \frac{1}{C} \cdot q \quad (3.3)$$

kde e je zobecněná síla. Dalším způsobem, jak zaznamenat energii akumulovanou v lineární zobecněné poddajnosti C je pomocí potenciální energie $\nu(q)$, kde

$$\nu(q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot q^2. \quad (3.4)$$

Pokud z předchozí rovnice (3.3) vyjádříme zobecněnou pozici

$$q = C \cdot e, \quad (3.5)$$

získáme další vztah pro potenciální energii $\nu(e)$, kde

$$\nu(e) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot q^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot C^2 \cdot e^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot e^2. \quad (3.6)$$

Pro hydraulický systém je zobecněná síla e tlakem p a zobecněná pozice q je objemem V . Tedy platí, že tlak na dně hydraulického systému (tlak na dně vodního rezervoáru – přehrady) je

$$p = \frac{1}{C} \cdot V, \quad (3.7)$$

kde poddajnost C je

$$C = \frac{A}{\rho \cdot g}. \quad (3.8)$$

ρ je objemová hustota, g je tíhové zrychlení a A je obsah podstavy koryta. Po dosazení poddajnosti C do rovnice (3.7) dostáváme

$$p = \frac{1}{C} \cdot V = \frac{1}{\frac{A}{\rho \cdot g}} \cdot V = \frac{\rho \cdot g}{A} \cdot V. \quad (3.9)$$

Aby byla poddajnost C lineární, musí být obsah podstavy neměnný, tedy závislost tlaku na objemu musí být lineární. Toto však pro náš model neplatí, proto bylo potřeba aproximovat koryto tak, abychom měli přesné povědomí o závislosti objemu V na tlaku p , $f_C(V)$.

3.4.1 Aproximace tvaru přehrady

Z obrázku 3.2 je patrné, že celkový objem v nádrži V je

$$V = V_0 + 2 \cdot V_s, \quad (3.10)$$

kde objemy kvádrů V_0 a objemy hranolu s podstavou pravoúhlého trojúhelníka V_s jsou

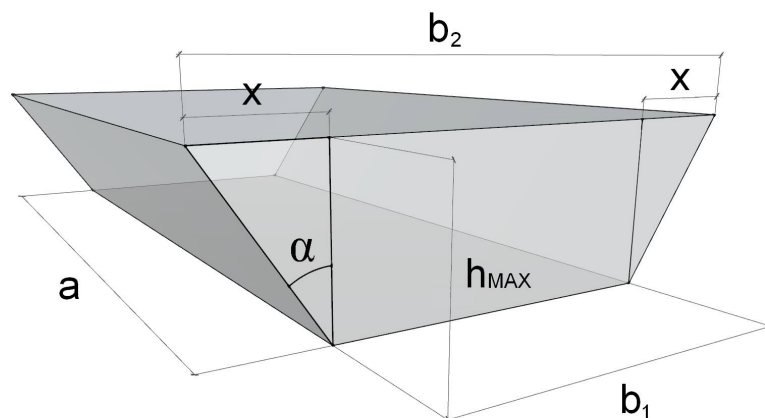
$$V_0 = b_1 \cdot h \cdot a \quad (3.11)$$

$$2 \cdot V_s = x \cdot h \cdot a. \quad (3.12)$$

Délka x a vnitřní úhel lichoběžníku α jsou dány vztahy

$$x = h \cdot tg(\alpha), \quad (3.13)$$

$$tg(\alpha) = \frac{\frac{b_2 - b_1}{2}}{h_{max}} \quad (3.14)$$



Obrázek 3.2: Aproximované tvaru přehrady

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\frac{b_2 - b_1}{2}}{h_{max}}\right). \quad (3.15)$$

Po dosazení do rovnice (3.10) získáváme celkový objem V

$$V = b_1 \cdot h \cdot a + h \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot h \cdot a = b_1 \cdot h \cdot a + h^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot a. \quad (3.16)$$

Tímto jsme získali závislost objemu V na hladině h . Pro získání závislosti objemu V na tlaku p nahradíme hladinu h vztahem

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}. \quad (3.17)$$

Tedy celkový objem V je

$$V = b_1 \cdot \frac{p}{\rho \cdot g} \cdot a + \left(\frac{p}{\rho \cdot g}\right)^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot a. \quad (3.18)$$

Jelikož potřebujeme závislost tlaku p na objemu V , musíme provést inverzi rovnice (3.18) pro hodnoty tlaku v intervalu $< 0, \infty)$ vyřešením kvadratické rovnice. Tedy dostáváme

$$p = \frac{-\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g} + \sqrt{\left(\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g}\right)^2 + 4 \cdot \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\rho^2 \cdot g^2} \cdot V}}{\frac{2 \cdot a \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\rho^2 \cdot g^2}}. \quad (3.19)$$

3.5 Resistance závislá na otevření ventilu u $f_R(u)$

Zobecněná resistance R je prvek, který energii spotřebovává. Pro lineární zobecněnou resistanci R platí, že

$$e = R \cdot \dot{q}, \quad (3.20)$$

kde e je zobecněná síla a \dot{q} je zobecněná rychlost. Pro hydraulický systém je zobecněná síla e tlakem p a zobecněná rychlost \dot{q} je tokem Q . V našem případě je resistance R rovna

$$p = f_R(u) \cdot Q, \quad (3.21)$$

kde závislost resistance R na otevření ventilu je

$$f_R(u) = u^{k_2} \cdot k_1, \quad (3.22)$$

kde u je otevření ventilu v intervalu od 0 - zavřeno do 1 - otevřeno. k_1 a k_2 jsou konstanty určující křivku závislosti rezistance R na otevření ventilu u , $f_R(u)$.

3.6 Nelineární model

Rovnice popisující výše popsaný systém je

$$\dot{q} = Q_{in} - Q_{out}, \quad (3.23)$$

kde

$$Q_{out} = \frac{f_C(V)}{f_R(u)} = \frac{-\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g} + \sqrt{\left(\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g}\right)^2 + 4 \cdot \frac{a \cdot tg(\alpha)}{\rho^2 \cdot g^2} \cdot V}}{\frac{2 \cdot a \cdot tg(\alpha)}{\rho^2 \cdot g^2}} \cdot \frac{1}{u^{k_2} \cdot k_1}. \quad (3.24)$$

Tedy

$$\dot{q} = Q_{in} - \frac{-\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g} + \sqrt{\left(\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g}\right)^2 + 4 \cdot \frac{a \cdot tg(\alpha)}{\rho^2 \cdot g^2} \cdot V}}{\frac{2 \cdot a \cdot tg(\alpha)}{\rho^2 \cdot g^2}} \cdot \frac{1}{u^{k_2} \cdot k_1}, \quad (3.25)$$

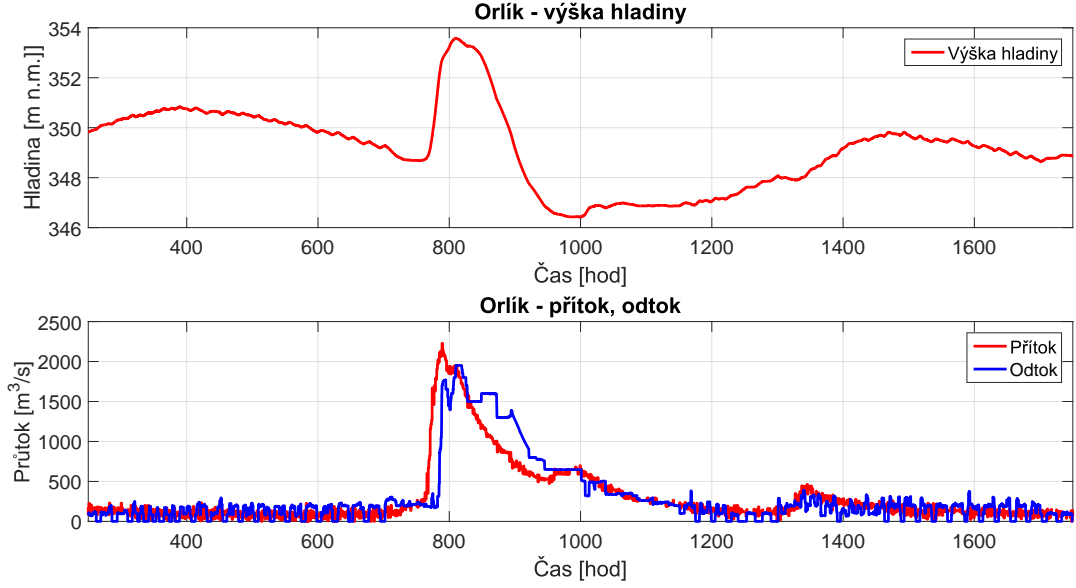
kde Q_{in} je přítok, Q_{out} je odtok, V je objem a u je otevření ventilu. Z obr. 3.2 je zřejmé, že b_1 je šířka dna a a je délka aproximovaného tvaru přehrady, α je vnitřní úhle lichoběžníku, k_1 a k_2 jsou parametry určující závislost $f_R(u)$, ρ je hustota vody a g je gravitační zrychlení.

3.7 Parametrizace nelineárního modelu

Pro získání parametrů nelineárního modelu přehrady a matematického modelu limnigrafu byla získána veřejně přístupná data z povodí Vltavy [5] a data poskytnutá přímo od zástupců Povodí Vltavy.

- Byl vytvořen program na automatické stahování dat z povodí Vltavy, který se pravidelně aktualizoval každých 10 minut. Byla stahována data k jednotlivým vodním dílům Vltavské kaskády: aktuální čas změřených hodnot, hladina vody v nádrži, objem vody v nádrži, přítok a odtok vody do/z nádrže. Ale byla stahována i data k jednotlivým limnigrafům Vltavské kaskády: aktuální čas změřených hodnot, výška hladiny a průtok profilem vodního toku. Program byl napsán v programovacím jazyku JAVA ve vývojovém prostředí NetBeans IDE pomocí knihovny Jsoup.
- Zároveň nám byl poskytnut balík cenných dat od zástupců státní firmy povodí Vltavy, které zaznamenávaly data k jednotlivým vodním dílům i k jednotlivým limnigrafům Vltavské kaskády od 1.5.2013 – 1.8.2013. Cenná byla nejen pro svou rozsáhlost, ale i kvůli zaznamenané povodňové vlně (viz obr. 3.3), která se Vltavskou kaskádou šířila při povodni v červu roku 2013. Kvůli výše popsaným výhodám, byla tato data použita k parametrizaci nelineárních modelů přehrad.
- Jelikož dodaná data neobsahovala hodnoty přítoku, byl dopočítán z diskrétní objemové rovnice

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out}. \quad (3.26)$$



Obrázek 3.3: Povodňová vlna z dat procházející VD Orlík

Z obr. 3.3 je vidět, že tvarem odpovídá obecné povodňové vlně z obr. 1.1.

3.7.1 Získání parametrů

Nejprve byla zjištěna délka aproximovaného koryta přehrady a (viz obr. 3.2), která byla zjištěna pomocí známé šířky přehrady b_2 a plochy zadržované vody P_v , tak že

$$a = \frac{P_v}{b_2}. \quad (3.27)$$

Na základě výpočtu hodnoty délky aproximovaného koryta a byly parametry nelineárního modelu vypočteny pomocí soustavy dvou rovnic o dvou neznámých,

$$b_2 = b_1 + 2 \cdot \tan \alpha \cdot h_{max}, \quad (3.28)$$

$$V_{CELK} = h_{max} \cdot b_1 \cdot a + h_{max}^2 \cdot a \cdot \tan(\alpha). \quad (3.29)$$

Po dosazení rovnice (3.28) do rovnice (3.29) bylo získáno

$$\tan(\alpha) = \frac{V_{CELK} - h_{max} \cdot a \cdot b_2}{h_{max}^2 \cdot a - 2 \cdot a \cdot h_{max}^2}. \quad (3.30)$$

Poté byla rovnice (3.30) dosazena do rovnice (3.28), bylo získáno

$$b_1 = b_2 - 2 \cdot \tan \alpha \cdot h_{max} = b_2 - 2 \cdot h_{max} \cdot \frac{V_{CELK} - h_{max} \cdot a \cdot b_2}{h_{max}^2 \cdot a - 2 \cdot a \cdot h_{max}^2}. \quad (3.31)$$

Pro nalezení parametrů k_1 a k_2 , které určují závislost rezistance R na otevření ventilu u

$$f_R(u) = u^{k_2} \cdot k_1, \quad (3.32)$$

byly použity otevírací křivky. Naším cílem bylo nalézt závislost rezistance R na otevření ventilu u $f_R(u)$. Po získání dat (viz kap. 3.7) byly ze získaných odtoků a k nim odpovídajícím objemům vypočítány odpovídající hodnoty tlaků na dně přehrady vztahem

$$p = \frac{1}{C} \cdot V = f_C(V) = \frac{-\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g} + \sqrt{\left(\frac{b_1 \cdot a}{\rho \cdot g}\right)^2 + 4 \cdot \frac{a \cdot \tan \alpha}{\rho^2 \cdot g^2} \cdot V}}{\frac{2 \cdot a \cdot \tan \alpha}{\rho^2 \cdot g^2}}. \quad (3.33)$$

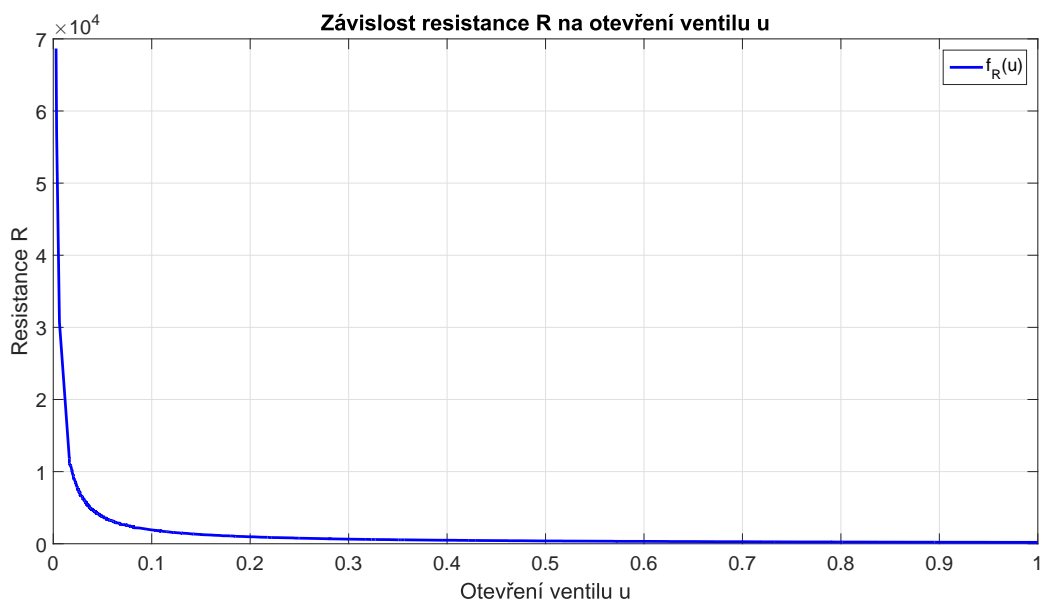
Ze získaných tlaků p byla získána aktuální resistance R vztahem

$$Q_{out} = \frac{p}{R}. \quad (3.34)$$

Byla získána resistance, která odpovídala aktuální situaci, tedy odpovídala objemu, odtoku a z nich vypočtenému tlaku,

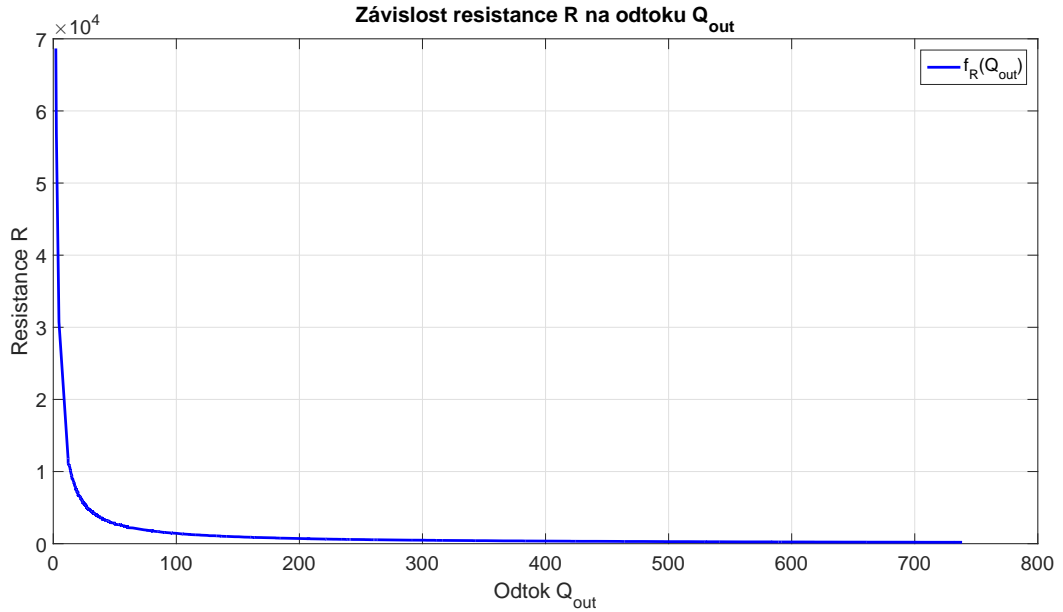
$$R = \frac{p}{Q_{out}}. \quad (3.35)$$

Ze získaných dat o odtocích byl nalezen maximální odtok, kterým byly poděleny zbylé odtoky. Tím jsme získali parametr otevření ventilu u v intervalu $< 0; 1 >$. Poté byly hodnoty resistance R a hodnoty otevření u seřazeny v pořadí od největší k nejmenší resistanci R a od nejmenšího otevření k plnému otevření ventilu u , tedy k 1.



Obrázek 3.4: Závislost R na u pro VD Hněvkovice

Kvůli potřebě odzkoušení, zda-li je tato otevírací křivka funkční, bylo otevření u nahrazeno odtokem Q_{out} . Vznikla tedy závislost resistance R na odtoku Q_{out} , $f_R(Q_{out})$.



Obrázek 3.5: Závislost R na Q_{out} pro VD Hněvkovice

Pro snazší matematickou optimalizaci, ale i vzhledem ke skutečnosti, bylo odstraněno nulové otevření ventilu u (i nulové odtoky) a k nim odpovídající nekonečná resistance R .

Získání parametrů otvírací křivky pomocí metod optimalizace

Pro účely získání parametrů otvírací křivky pomocí matematické optimalizace bylo použito prostředí programu Matlab, které bylo vybaveno optimalizačním toolboxem. Jako účelová funkce pro tuto matematickou optimalizaci byla použita hyperbolická rovnice (3.22). Využívá se standardní nastavení optimalizačních parametrů. Pro naše účely byla použita optimalizační metoda nelineární nejmenších čtverců. Používá Gauss-Newtonovu metodu a Levenberg-Marquardův algoritmus pro optimalizaci nelineárních úloh metodou nejmenších čtverců lsqnonlin [15]. Funkce lsqnonlin realizuje rovnici

$$\min_x \frac{1}{2} \|F(x)\|_2^2 = \min_x \frac{1}{2} \sum_i F_i(x)^2, \quad (3.36)$$

kde vektor x obsahuje optimalizované parametry a $F_i(x)$ je vektor výstupních hodnot funkce $F(x)$. Na účelovou funkci lze klást omezení pouze v podobě

$$lb \leq x \leq ub, \quad (3.37)$$

kde lb je minimum a ub je maximum optimalizovaného parametru. Tímto způsobem jsme dostali optimalizované parametry k_1 a k_2 .

Tímto způsobem byly získány všechny potřebné parametry do nelineárního modelu.

3.8 Ukázka vyčíslených parametrů pro VD Hněvkovice

	Hněvkovice
Šířka přehrady b_2 [m]	191
Plocha zadržované vody P_v [ha]	276,7
Délka aproximovaného koryta a [m]	14486,9
Délka b_1 [m]	3,2
Úhel α [°]	80,92
Parametr k_1 pro $f_R(u)$ [-]	181,734
Parametr k_2 pro $f_R(u)$ [-]	-1,0121
Parametr k_1 pro $f_R(Q_{out})$ [-]	145352,201
Parametr k_2 pro $f_R(Q_{out})$ [-]	-1,012

Tabulka 3.2: Ukázka vyčíslených parametrů VD Hněvkovice

3.9 Simulace nelineárního modelu

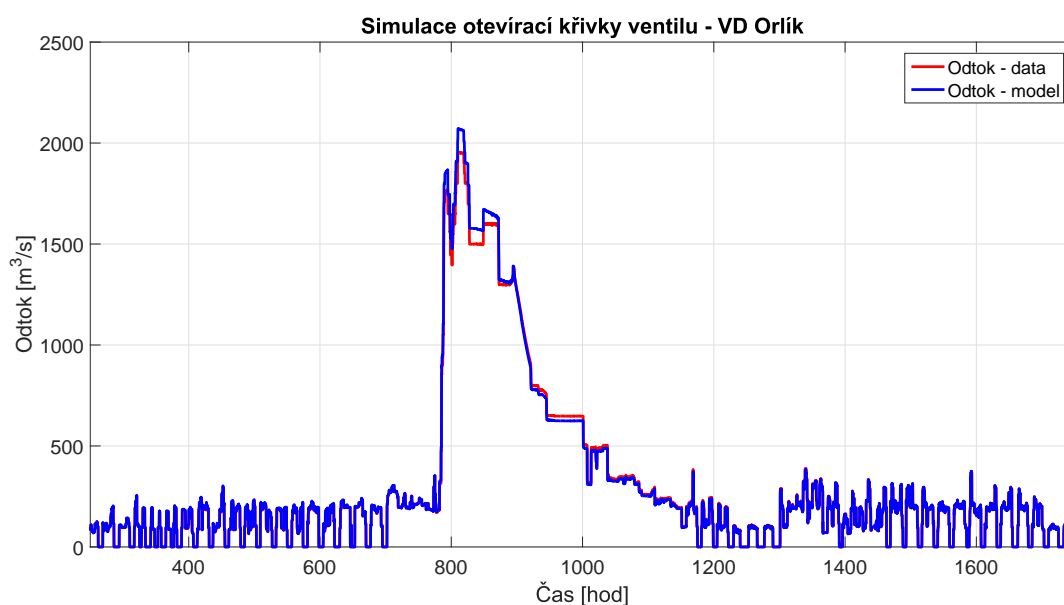
Simulace nelineárního modelu byla provedena ve vývojovém prostředí programu Matlab/Simulink. Simulace byla proveden na VD Orlík (obr. 3.6).

3.9.1 Přetečení hladiny

Přetečení vody přes hranu přehrady bylo simulováno pomocí bloku M-function. Pokud objem dosáhne svého retenčního maxima, v systému pokračuje tato maximální hodnota objemu a přítok je odkloněn a přičten k odtoku. Pokud hodnota objemu klesne pod maximální retenční objem, rozdíl přítoku a odtoku je veden přes integrátor dál do systému. Při dosažení maximálního retenčního objemu dosáhneme maximální retenční hladiny.

3.9.2 Simulace otevírací křivky ventilu

Pro ověření, zda-li je navrhnutá otevírací křivka správná, jsme na vstup modelu přivedli ze získaných dat přítok, počáteční objem a chtěný odtok. Na výstupu jsme porovnávali odtok modelu s dodaným odtokem.



Obrázek 3.7: Simulace funkčnosti otevírací křivky

Z grafu je patrné, že otevírací křivka je velmi přesná pro nízké průtoky avšak s nepřesností pro povodňové průtoky. Simulace funkčnosti otevírací křivky zbývajících VD lze nalézt v příloze B.

3.9.3 Minimální otevření ventilu

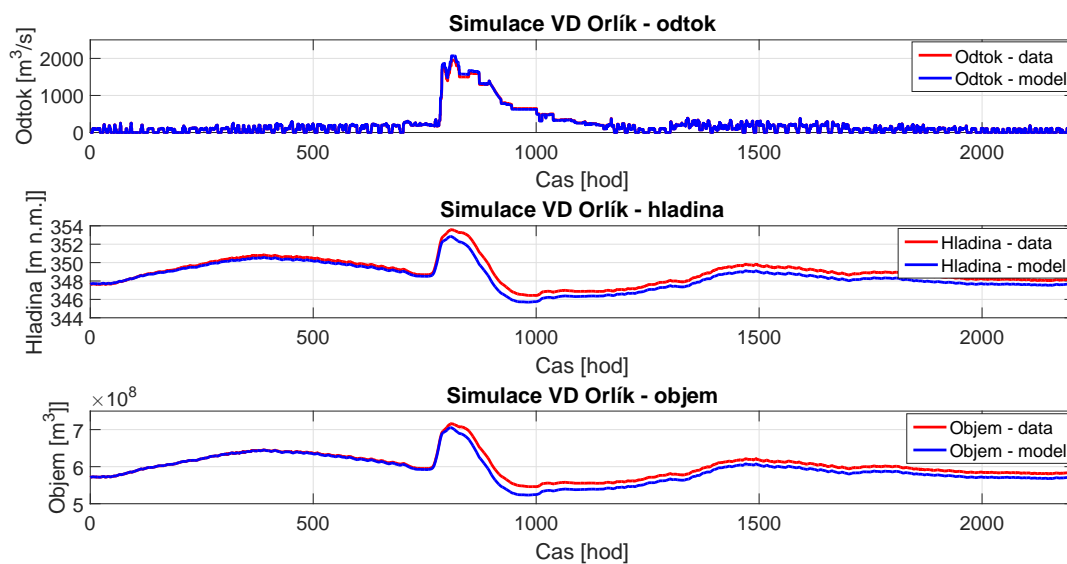
Aby se nestalo, že by odtok z přehrady byl nulový, bylo nastaveno minimální otevření ventilu takové, aby odpovídalo minimálnímu odtoku vody z přehrady (viz kap. 2.5).

3.9.4 Bloky zpožďující objem

Kvůli sériovému zapojení se zpožděním mezi jednotlivými přehradami ve Vltavské kaskádě, bylo nutné dosáhnout nulové hladiny i odtoku, dokud voda nedoputuje do přehrady. Tedy pokud je přítok nulový, hladina i odtok jsou také nulové.

3.9.5 Simulace

Pro simulaci modelu přehrady jsme dodali do modelu přítok, počáteční objem a odtok ze získaných dat. Na výstupu jsme porovnávali odtok modelu s dodaným odtokem, hladinu modelu s dodanou hladinou a objem modelu s dodaným objemem.



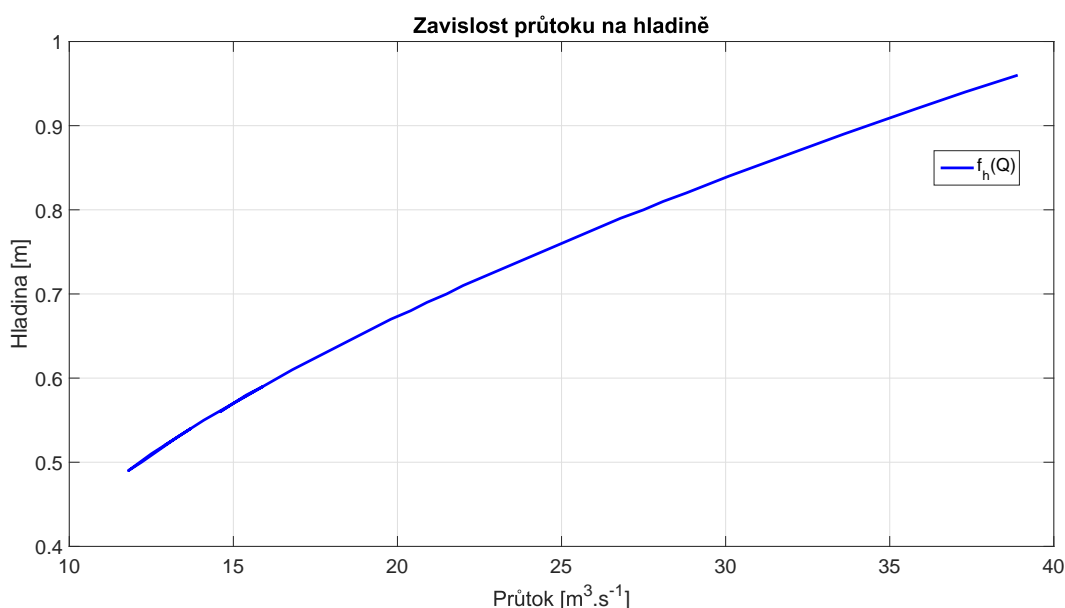
Obrázek 3.8: Simulace VD Orlík

Simulace zbývajících VD lze nalézt v příloze C.

4. Výpočet časového zpoždění vody

Pro výpočet časového zpoždění vody mezi jednotlivými přehradami Vltavské kaskády byly použity limnigrafní stanice, které se nacházejí za každou přehradou Vltavské kaskády ale i různě na vodní cestě Vltavy. Na základě získaných dat z těchto limnigrafních stanic (viz kap. 3.7) byly obdobnou matematickou optimalizací (viz kap. 3.7.1 - Získání parametrů otvácací křivky pomocí metod optimalizace) zjištěny parametry konzumčních křivek (konzumční křivky limnigrafů lze nalézt v příloze D). Jako účelovou funkci pro tuto matematickou optimalizaci byla použita kvadratická rovnice

$$h = k_3 + k_2 \cdot Q + k_1 \cdot Q^2 \quad (4.1)$$



Obrázek 4.1: Ukázka konzumční křivky LG Břeží

Tímto způsobem jsme z aktuálního průtoku dokázali získat aktuální výšku vodního stavu. Pro výpočet časového zpoždění vody Δt , bylo nejprve nutno vypočítat rychlost vody v

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{h \cdot s}, \quad (4.2)$$

kde Q je průtok, S je průtočná plocha, h je výška hladiny a s je šířka koryta. Získáním rychlosti vody v bylo vypočítáno časové zpoždění Δt

$$\Delta t = \frac{d}{v}, \quad (4.3)$$

kde d je vzdálenost mezi dvěma měřicími body a v je aktuální rychlost. Tím jsme získali časové zpoždění vody mezi dvěma měřicími body, ale pouze za předpokladu, že mezi těmito body nebude žádný přítok, který by změnil rychlost vody v , tedy i časové zpoždění Δt . Avšak často mezi dvěma měřicími body nějaký přítok je. Proto byla přítékající řeka ve správném poměru¹ přičtena k přítoku pro správné vypočtení rychlosti v , tedy i pro správné časové zpoždění, ale zároveň tak, aby nezkrusila hladinu vody získanou pomocí konzumční křivky vstupujícím průtokem.

¹Byla zjištěna vzdálenost místa vtoku přítoku od obou měřících bodů (pomocí říčních kilometrů).

4.1 Ukázka výpočtu časového zpoždění vody mezi dvěma limnigrafními stanicemi s přítokem

- Ukázka vyčíslených parametrů pro limnigrafickou stanicí LG Březí

	LG Březí
Parametr k_1 pro $f_h(Q)$ [-]	-2,2559e-04
Parametr k_2 pro $f_h(Q)$ [-]	0,0284
Parametr k_3 pro $f_h(Q)$ [-]	0,1923
Šířka koryta [m]	38,12
Říční kilometr [km]	249,7
Průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	38,9
Výška hladiny [m]	0,95653
Průtočná plocha [m^2]	36,4629
Rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	1,0668

Tabulka 4.1: Vyčíslených parametrů pro LG Březí

	LG Březí
Průměrný roční průtok řeky Malše [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	6,92
Říční kilometr řeky Malše [km]	240,0
Poměr vzdáleností (viz kap. 4) [-]	0,1081
Součet průtoků [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	39,648
Výška hladiny [m]	0,9646
Průtočná plocha [m^2]	36,770552
Rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	1,07825

Tabulka 4.2: Změna parametrů po přítoku řeky Malše

- Ukázka vyčíslených parametrů pro limnigrafickou stanicí LG České Budějovice

	LG České Budějovice
Parametr k_1 pro $f_h(Q)$ [-]	-7,5482e-05
Parametr k_2 pro $f_h(Q)$ [-]	0,0079
Parametr k_3 pro $f_h(Q)$ [-]	0,9229
Šířka koryta [m]	30,714
Říční kilometr [km]	238,8

Tabulka 4.3: Vyčíslených parametrů pro LG České Budějovice

Dále byla vzata taková vzdálenost, ve které se daný přítok podílí na celkovém toku Vltavy mezi měřícími body a tato vzdálenost byla podělena celkovou vzdáleností mezi dvěma měřícími body. Tímto způsobem jsme dostali poměr, kterým jsme vynásobili daný fiktivní přítok a přičetli jsme ho k aktuálnímu průtoku. Nakonec byl skutečný přítok přičten k průtoku mezi měřícími body, neboť zde zvýšení průtoku nezmění rychlost vody v , tedy ani časové zpoždění Δt .

- Ukázka výpočtu časového zpoždění vody mezi dvěma limnigrafními stanicemi

	Čas. zpoždění mezi LG Březí a LG České Buděj.
Vzdálenost mezi měřícími body [m]	10900
Časové zpoždění Δt [s]	10217,5

Tabulka 4.4: Výpočet časového zpoždění vody mezi LG Březí a LG České Budějovice

	Čas. zpoždění mezi LG Březí a LG České Buděj.
Vzdálenost mezi měřícími body [m]	10900
Časové zpoždění Δt [s]	10109

Tabulka 4.5: Změna parametrů po přítoku řeky Malše

Tedy dostáváme, že po přítoku řeky Malše se časové zpoždění zmenší o 108,5 vteřin.

5. Optimalizovaný model přehrady

Oproti klasickému přístupu modelování pomocí fyzikálních principů byla zvolena druhá metoda vytvoření modelu na základě optimalizace, která vychází pouze ze získaných dat a vazeb mezi nimi. I když je postup jiný, na základě jiných podkladů, snažili jsme se oba modely udělat tak, aby z vnějšího pohledu vypadaly stejně (Q_{in} , Q_{out} , otevření ventilu u , nastavení počátečního objemu). Na základě skutečnosti (viz kap. 2.3), že mezi hladinou vody a objemem vody v nádrži panuje kvadratická závislost

$$V = a_1 + a_2 \cdot h + a_3 \cdot h^2, \quad (5.1)$$

tak účelovou funkcí matematické optimalizace je kvadratická rovnice (5.1). Při použití této rovnice byly hodnoty účelové funkce kritéria v minimu přibližně 10^{-5} . Tedy při použití této funkce se správnými parametry a po dosazení hladiny vody h dostáváme objem V . Pro přehradu jistě platí tato rovnice

$$\dot{q} = \frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} = Q_{in} - f_{Q_{out}}(u), \quad (5.2)$$

kde

$$f_{Q_{out}}(u) = k \cdot u. \quad (5.3)$$

Na rozdíl od matematického modelu je závislost odtoku na otevření ventilu u lineární. Tedy

$$\dot{q} = Q_{in} - k \cdot u. \quad (5.4)$$

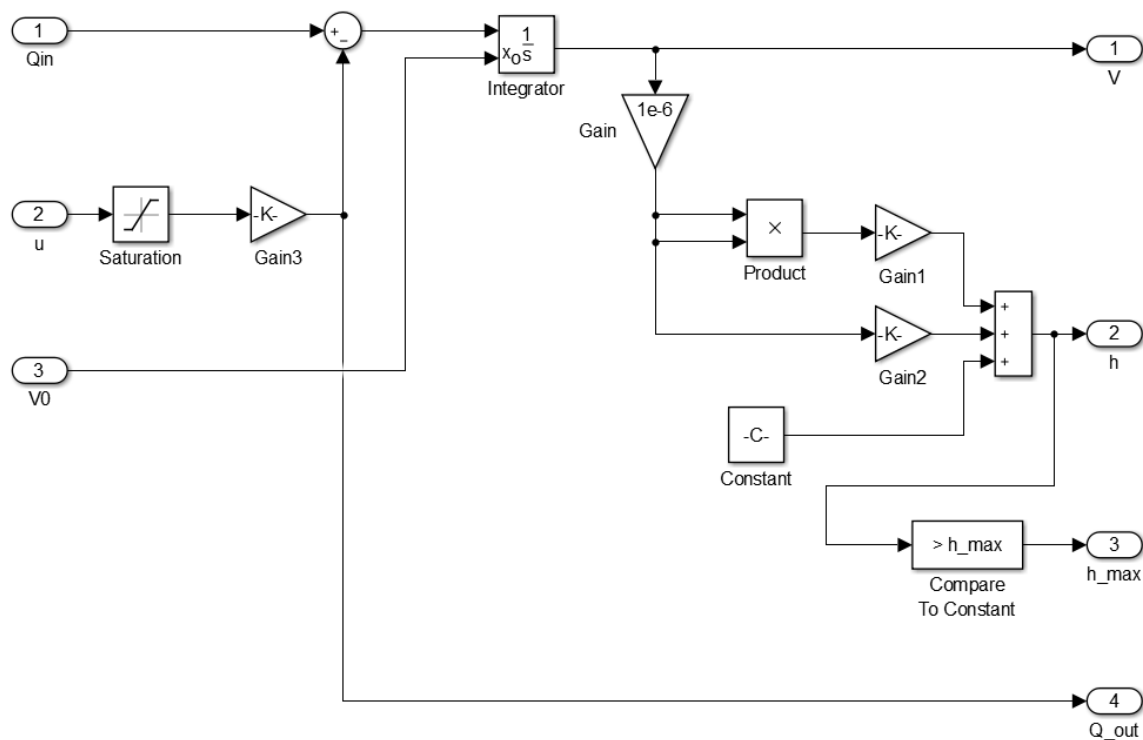
5.1 Ukázka vyčíslených parametrů pro VD Hněvkovice

	Hněvkovice
Parametr a_1 pro $f_V(h)$ [-]	361,574
Parametr a_2 pro $f_V(h)$ [-]	0,438
Parametr a_3 pro $f_V(h)$ [-]	-0,0016
Parametr k pro $f_{Q_{out}}(u)$ [-]	738,455

Tabulka 5.1: Ukázka vyčíslených parametrů VD Hněvkovice

5.2 Simulace nelineárního modelu

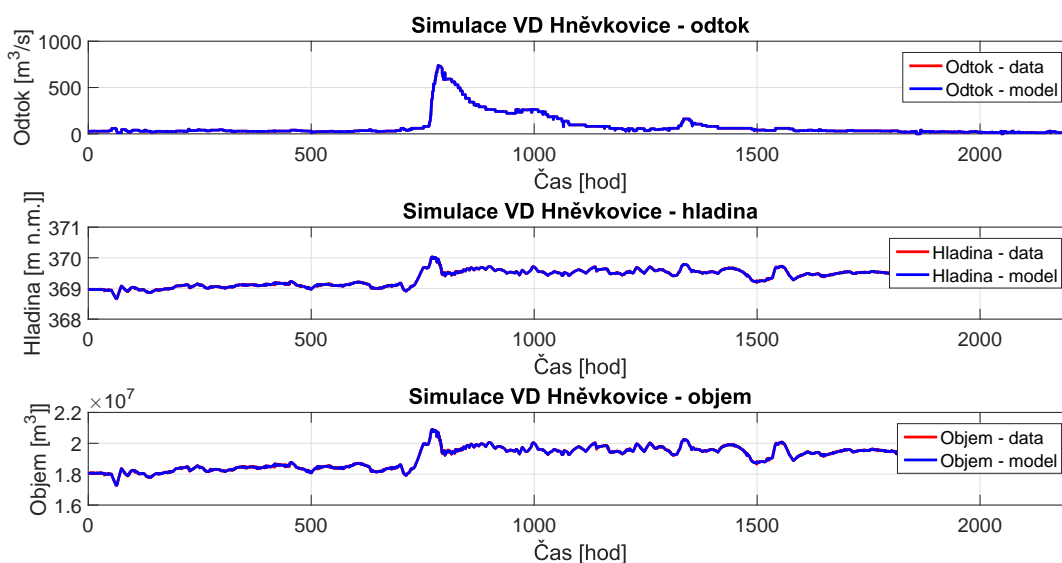
Simulace nelineárního modelu byla provedena ve vývojovém prostředí programu Matlab/Simulink. Simulace byla proveden na VD Hněvkovice (obr. 5.1).



Obrázek 5.1: Zapojení VD Hněvkovice

5.2.1 Simulace

Pro simulaci modelu přehrady jsme dodali do modelu přítok, počáteční objem a otevření ventilu u . Na výstupu jsme porovnávali odtok modelu s dodaným odtokem, hladinu modelu s dodanou hladinou a objem modelu s dodaným objemem.



Obrázek 5.2: Simulace VD Hněvkovice

Simulace zbývajících VD lze nalézt v příloze E.

6. Návrh řízení Vltavské kaskády

Abychom mohli navrhnout kvalitně fungující regulátory k jednotlivým vodním dílům Vltavské kaskády, je zapotřebí vytvoření kvalitních modelů vodních děl. Jelikož jsou tyto modely nelineární, bylo zapotřebí je pro návrh regulátorů linearizovat ve vhodně zvolených pracovních bodech. Řízení Vltavské kaskády bylo rozděleno do dvou částí. V první části byla navržena objemová regulace vody pro každé vodní dílo. V druhé části bylo navrženo distribuované řízení, které se staralo o správné nastavení referencí požadovaných objemů pro objemovou regulaci.

6.1 Lineární aproximace modelu

Jde o náhradu nelineárního dynamického systému lineárním modelem. Vstupem do modelu přehrady je otevření ventilu u . Výstupem je objem vody v nádrži. Pro linearizaci se nejprve vypočítají derivace diferenciální rovnice (nevyčíslená dif. rovnice) podle stavu q a výstupu u .

$$\frac{dq}{dq} = - \frac{1}{k_1 \cdot u^{k_2} \cdot \sqrt{\frac{a^2 \cdot b_1^2}{g^2 \cdot \rho^2} + \frac{4 \cdot a \cdot \tan \alpha \cdot q}{g^2 \cdot \rho^2}}} \quad (6.1)$$

$$\frac{dq}{du} = \frac{g^2 \cdot k_2 \cdot \rho^2 \left(\sqrt{\frac{a^2 \cdot b_1^2}{g^2 \cdot \rho^2} + \frac{4 \cdot a \cdot \tan \alpha \cdot q}{g^2 \cdot \rho^2}} - \frac{a \cdot b_1}{g \cdot \rho} \right)}{2 \cdot a \cdot k_1 \cdot \tan \alpha \cdot u^{k_2+1}} \quad (6.2)$$

Přítok do nádrže Q_{in} pro linearizovaný model pro potřeby řízení představuje měřitelnou poruchu, proto se v rovnicích nevyskytuje.

Pro zvolení vhodného pracovního bodu jsme nejprve zjistili průměrnou hladinu ze získaných dat. Této hladiny jsme se snažili dosáhnout vhodně zvoleným pracovním bodem objemu V_{prac} . Dále jsme z [11] získaly hodnoty průměrného ročního odtoku Q_a , kterého jsme se snažili dosáhnout vhodně zvoleným pracovním bodem otevřením ventilu u_{prac} .

Po dosažení zvoleného pracovního bodu do rovnic (6.1) a (6.2), získáme stavové popis spojitého systému, který je určen maticemi A, B, C a D.

$$A = \left(\frac{dq}{dq} \right) \quad (6.3)$$

$$B = \left(\frac{dq}{du} \right) \quad (6.4)$$

$$C = (1) \quad (6.5)$$

$$D = (0) \quad (6.6)$$

Tím získáme stavový popis lineárního časově invariantního spojitého dynamického systému.

$$\dot{q} = A \cdot q + B \cdot u \quad (6.7)$$

$$y = C \cdot q + D \cdot u \quad (6.8)$$

Pro získání přenosové funkce systému $G(s)$ ze vstupu na výstup použijeme funkci $ss(A,B,C,D)$ ve vývojovém prostředí MATLAB.

6.1.1 Ukázka výpočtu pracovního bodu pro VD Slapy

	Slapy
Průměrná hladina [m]	269,6679
Objem vody [$10^6 \cdot \text{m}^3$]	258.46
Průměrný roční odtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	85,2
Otevření ventilu [-]	0,0422

Tabulka 6.1: Ukázka výpočtu pracovního bodu pro VD Slapy

Pro vypočtení stavových matic dosadíme nalezený pracovní bod do vypočítaných diferenciálních rovnic (6.1) a (6.2), pomocí kterých získáme přenosovou funkci $G(s)$

$$G(s) = -\frac{2010}{s + 1.351 \cdot 10^{-7}} \quad (6.9)$$

Z přenosové funkce je zřejmé, že systém je stabilní a má jeden pomalý pól p_1

$$p_1 = -1.351 \cdot 10^{-7}. \quad (6.10)$$

6.2 Návrh řízení v režimu objemové regulace

Pro objemovou regulaci vodních děl Vltavské kaskády, byl pro každé vodní dílo navrhnut P regulátor. Regulátor přenásobí odchylku výstupní hodnoty od požadované hodnoty danou konstantou. Díky tomu, že sama soustava je integračního charakteru a nepracuje s dynamikou vody, proporcionální regulátor se jevil jako nejlepší možnost. Vstupem do regulátoru je reference požadovaného objemu a výstupem je akční zásah v podobě otevření ventilu u . Hlavním požadavkem na regulátor bylo, aby splňoval požadavky nadřazeného řízení a aby měl malou ustálenou regulační odchylku. Pro přenos proporcionálního regulátoru platí

$$C(s) = k_p, \quad (6.11)$$

kde k_p je proporcionální složka.

6.2.1 Nalezení parametrů k_p

Pro nalezení správných parametrů k_p byla použita metoda *rootlocus*, neboli geometrické místo kořenů. Po zjištění parametrů k_p byly takto vytvořené regulátory vyzkoušeny na nelineárních soustavách VD.

6.2.2 Diskretizace nalezeného regulátoru

I přesto, že jsme navrhli spojitý regulátor na spojitý systém, provedeme diskretizaci regulátoru, neboť v praxi vyskytující se regulátory jsou diskrétní. Využili jsme funkci ve vývojovém prostředí Matlab/Simulink, se zvolenou vzorkovací periodou $T_s = 600\text{s}$.

6.2.3 Příklad nalezení parametru k_p pro VD Slapy

	Slapy
Parametr k_p [-]	$-8.0356 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 6.2: Nalezení parametru k_p pro VD Slapy

6.3 Návrh distribuovaného řízení

Zatímco v minulé podkapitole jsme se zabývali jednotlivými přehradami a jejich objemovou regulací, v distribuovaném řízení si klademe za cíl řídit Vltavskou kaskádu jako celek. Snahou je plnit roli centrálního dispečinku, které nastavuje požadované objemy jednotlivým vodním dílům a tím dává podnět lokální, objemové regulaci. Návrh tohoto typu řízení je založen na jednoduché myšlence nutnosti uchovávat ve Vltavské kaskádě stále stejný objem vody. Tedy pokud přitéká do Vltavské kaskády větší množství vody, regulace způsobí, že je tato nadměrná voda postupně zadržena a dle možností kaskády a v rámci kladených omezení odpuštěna. Na základě těchto informací lze sestavit optimalizační úlohu

$$\min_V \left\{ \alpha \|V - V_m\|_2 + \beta \left\| \sum_i V_i - V_{CELK} \right\|_2 \right\} \quad (6.12)$$

$$s.t. V_{min} \leq V \leq V_{max}, \quad (6.13)$$

kde V je vektor optimalizovaných objemů, které budou poslány do modelu jako referenční hodnoty P regulátorů, V_m je vektor změřených hodnot současných objemů ve vodních dílech, V_{CELK} je požadovaná hodnota celkového objemu vody ve Vltavské kaskádě a α a β jsou váhové konstanty. Zatímco se druhá část kritéria spíše stará o udržení celkového objemu vody ve Vltavské kaskádě, první složka zabraňuje vysoké změně hodnot požadovaných objemů. Nedochozí tedy k přeposílání povodňové vlny z přehrady na přehradu, ale uplatňuje se i akumulární charakter Vltavské kaskády. Pro účely simulace byly postupně odladěny váhové konstanty $\alpha = 0,001$ a $\beta = 1$. Jelikož se jedná o optimalizaci s omezením, je potřeba řešit úlohu pomocí numerického solveru. Pro účely simulace byla proto sestavena simulinková s-funkce, která dokáže volat potřebný solver přímo z prostředí Matlabu.

7. Simulace a řízení Vltavské kaskády za povodňového stavu

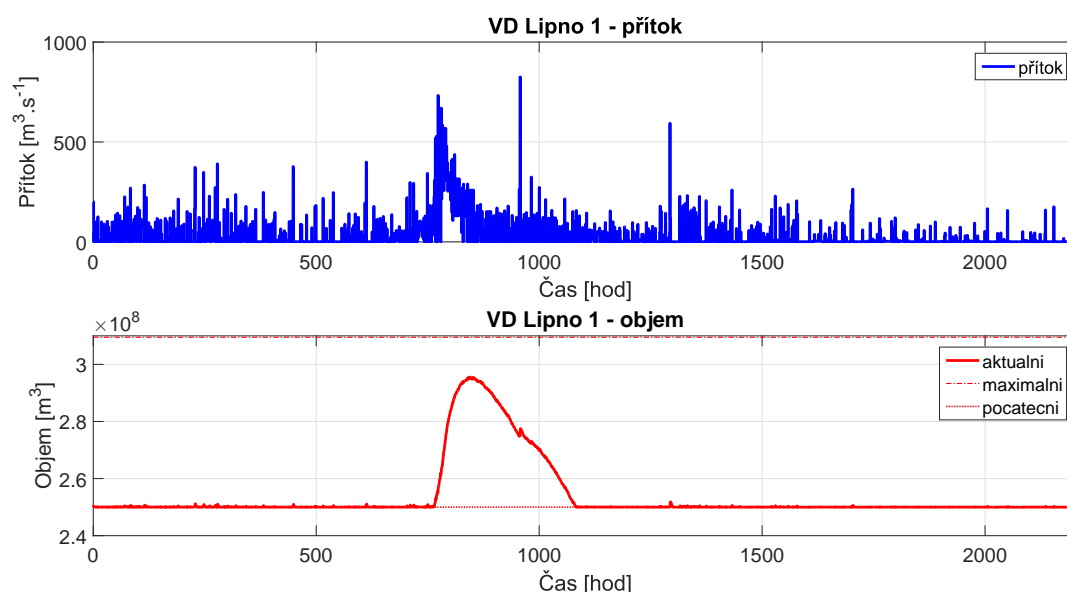
Pro účely simulace různých povodňových scénářů a řízení byla nejprve ze získaných dat vyjmuta povodňová vlna, která byla následně poslána do modelu Vltavské kaskády. Nejprve jsme odsimulovali řízení v režimu objemové regulace a potom distribuované řízení, které se stará o správné nastavení referencí požadovaných objemů pro objemovou regulaci.

7.1 Simulace a řízení v režimu objemové regulace

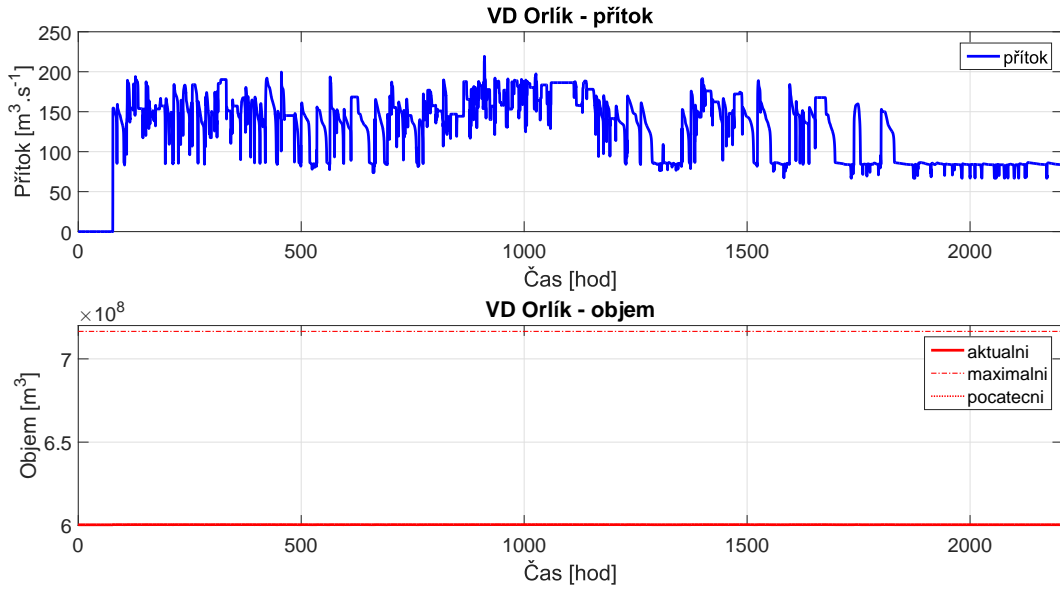
Pro dosažení a držení požadovaného objemu slouží řízení v režimu objemové regulace. Vstupem je referenční hodnota objemu a výstupem je nastavení otevření ventilu. Při simulaci řízení v režimu objemové regulace jsme nastavili jako referenční požadované objemy nejprve takové objemy, které jsou zároveň počátečními objemy. Poté jsme jako referenční požadované objemy nastavili maximální možné retenční objemy.

7.1.1 Referenční hodnota objemu je totožná s počáteční hodnotou objemu

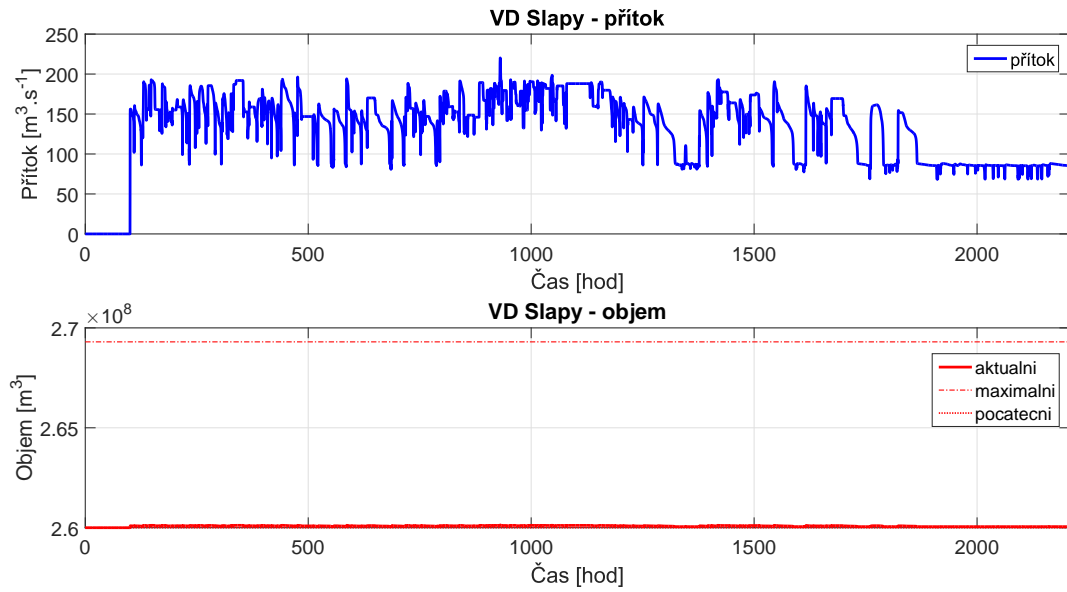
Při nastavení referencí požadovaných objemů v režimu objemové regulace na počáteční objemy, vodní díla Vltavské kaskády nevyužijí svůj volný prostor na zachycení povodňových průtoků, a proto se povodňová vlna šíří systémem ve stylu, co přiteče do přehrady nad rámec počátečního objemu, to odteče. Simulace zbývajících VD lze nalézt v příloze F.1.



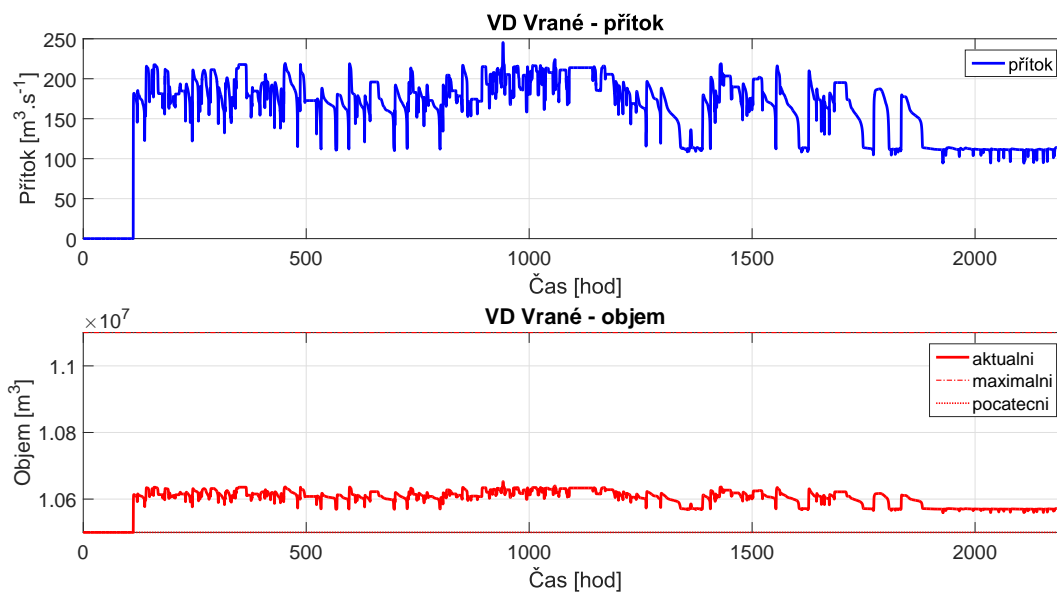
Obrázek 7.1: Režim objemové regulace I pro Lipno I



Obrázek 7.2: Režim objemové regulace I pro Orlik



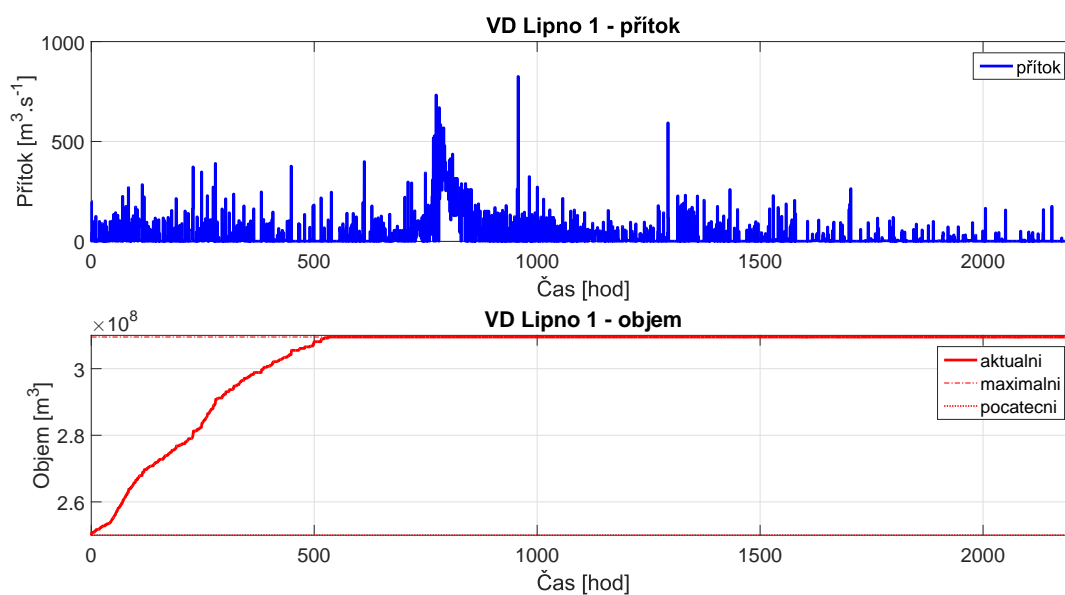
Obrázek 7.3: Režim objemové regulace I pro Slapy



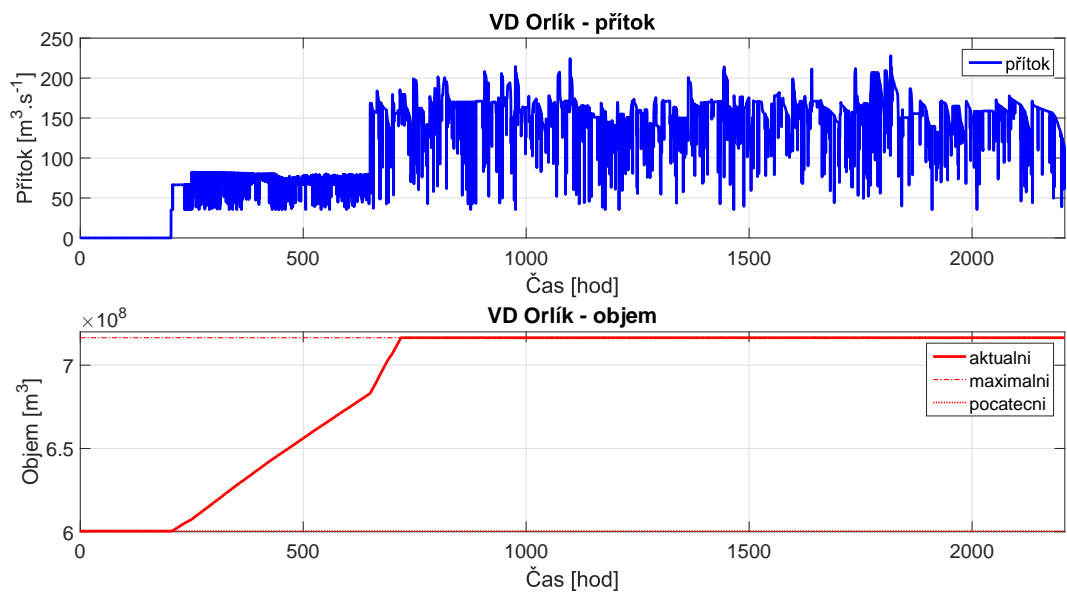
Obrázek 7.4: Režim objemové regulace I pro Vrané

7.1.2 Referenční hodnota objemu je maximální

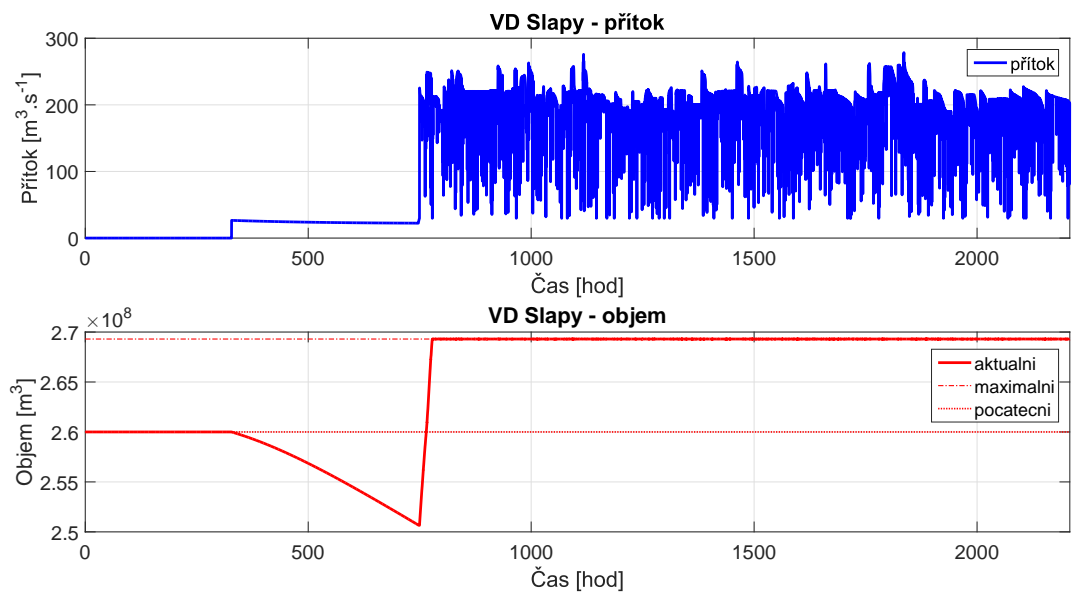
Při nastavení referencí požadovaných objemů v režimu objemové regulace na maximální retenční objemy, dosáhneme toho, že se Vltavská kaskáda bude chovat jako akumulátor vody. Kde každé sériově zapojené VD pojme takovou část povodňové vlny, aby plně zaplnilo svůj objem a dosáhlo tak maximálního retenčního objemu. Tímto způsobem bychom povodňové vlny dokázali výrazně zmírnit či plně pohltit v největších VD Vltavské kaskády. Simulace zbývajících VD lze nalézt v příloze F.2.



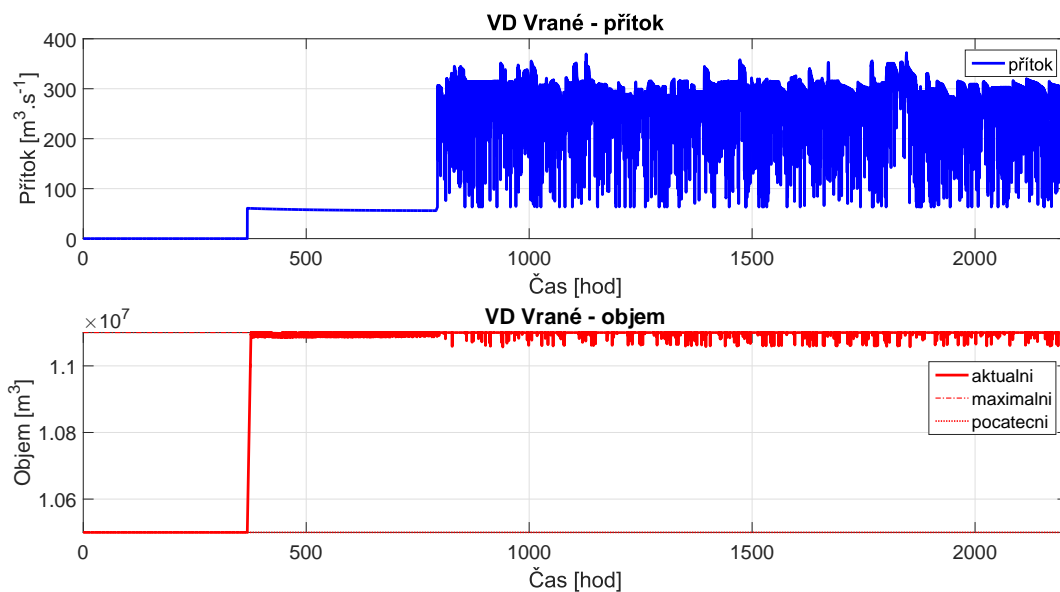
Obrázek 7.5: Režim objemové regulace II pro Lipno I



Obrázek 7.6: Režim objemové regulace II pro Orlik



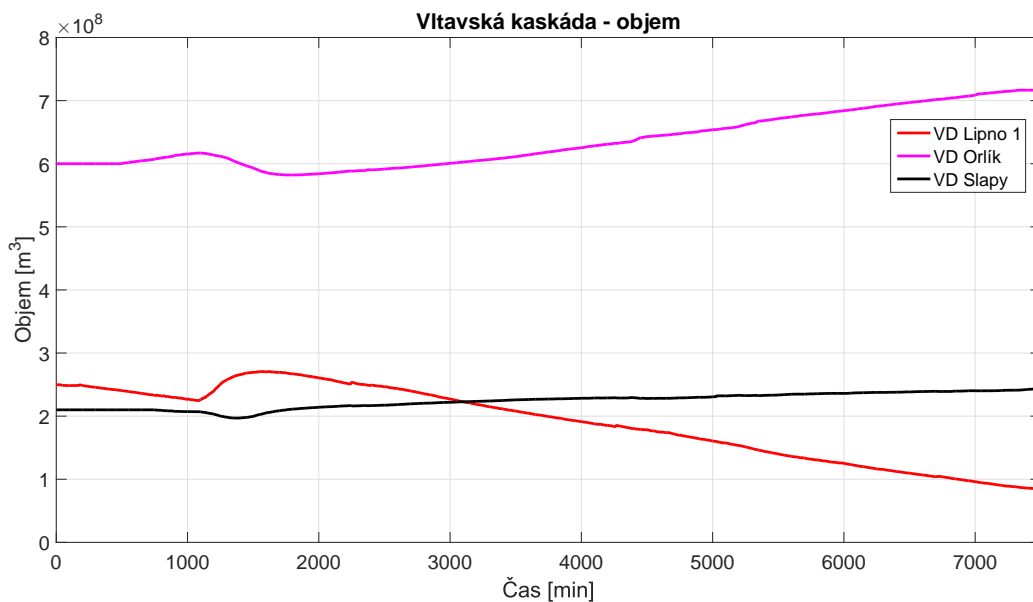
Obrázek 7.7: Režim objemové regulace II pro Slapy



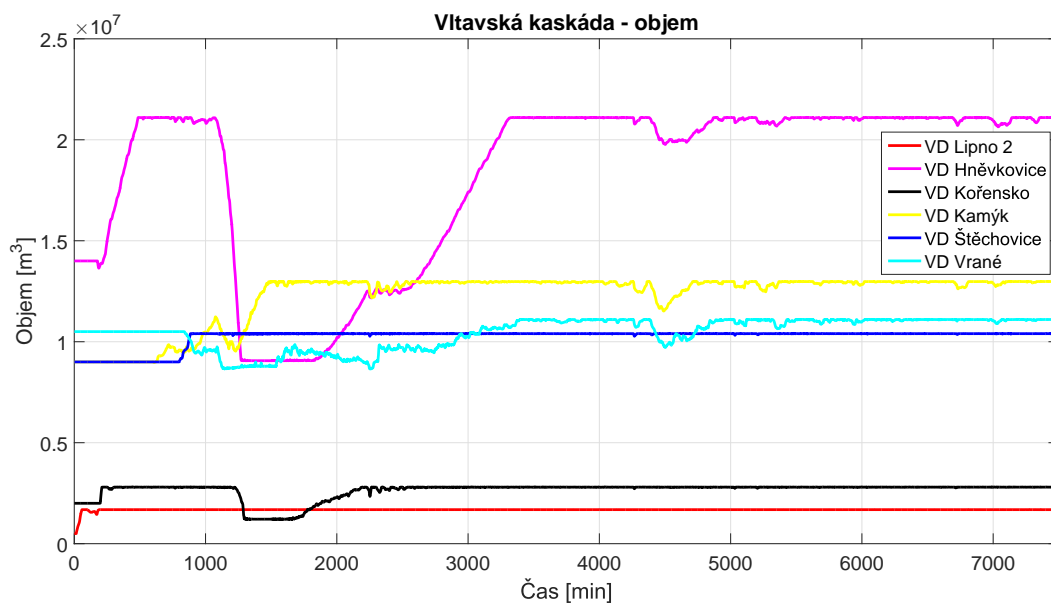
Obrázek 7.8: Režim objemové regulace II pro Vrané

7.2 Simulace a řízení v režimu distribuovaného řízení

Pro správné nastavení referencí požadovaných objemů objemové regulaci, slouží distribuované řízení, které plní roli centrálního dispečinku.



Obrázek 7.9: Režim distribuovaného řízení pro Lipno 1, Orlík, Slapy



Obrázek 7.10: Režim distribuovaného řízení pro Lipno 2, Hněvkovice, Kořensko, Kamýk, Štěchovice a Vrané

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvořit jednoduché matematické modely vodních děl Vltavské kaskády tak, abychom byli schopni vytvořit řídicí mechanismy, které zmírní či eliminují povodňovou vlnu.

Nejprve byl sestaven obecný matematický model, pomocí kterého byly dopočítány matematické modely k jednotlivým dílům Vltavské kaskády. Ty byly sestaveny tak, aby odpovídaly reálným vodním dílům Vltavské kaskády. Takto získaný model je nelineární. Nelinearita je způsobena rozdílnou plochou hladiny při různých výškách vody ve vodním díle. Jelikož tématem práce byla povodňová vlna, tedy dosahování maximální hladiny vody ve vodním díle, předpokládali jsme, že se hodnoty hladin nebudou výrazně vzdalovat od pracovních bodů. Proto byl pro naše účely vytvořen aproximovaný tvar přehrady, který byl popsán jednoduchou funkcí. Dále byly vytvořeny optimalizované modely na základě matematické optimalizace, které jsou nad rámec této práce.

Pro účely parametrizace matematického nelineárního modelu byla použita veřejně přístupná data, která byla programově stahována a zpracována. Vedle takto získaných dat, byla použita data z povodně 2013. Na základě technických údajů o vodním díle byl nelineární model vyčíslen. Pro vyčíslení resistance, která je závislá na otevření ventilu byla vytvořena otevírací křivka, jejíž parametry byly zjištěny pomocí metod optimalizace. Pro vyčíslení poddajnosti nádrže a pro následnou aproximaci tvaru přehrady byla použita technická data, určující každé vodí dílo Vltavské kaskády.

Takto vzniklé parametrizované nelineární modely byly následně simulovány. Nejprve byla simulována funkčnost otevírací křivky ventilu tak, že byla vytvořena nová závislost mezi resistancí a požadovaným odtokem $f_R(Q)$. Ta nám dovolila na vstup přivádět chtěný odtok, který byl otevírací křivkou převeden na potřebnou velikost resistance. Ta způsobila odtok z nelineárního modelu, který se velmi podobá požadovanému odtoku. Jelikož závislosti $f_R(Q)$ a $f_R(u)$ jsou ekvivalentní, byli jsme přesvědčeni, že otevírací křivka bude plnit svoji funkci správně. Aby hladina modelu reprezentovala skutečnost, tedy aby nedosahovala neomezené výšky, byl přidán blok pro přetečení hladiny. Ten, v případě dosažení maximální hladiny, způsobil, že aktuální přítok je veden přes hranu hráze a přičítá se přímo k odtoku z přehrady. Aby nedocházelo k destrukci životního prostředí, bylo nastaveno otevření ventilu na takovou hodnotu, aby při pracovním bodě odtok dosahoval minimální hodnoty. Kvůli sériovému zapojení vodních děl Vltavské kaskády byl přidán blok nulující odtok a výšku hladiny do té doby, než-li přiteče voda. Z porovnání uvedených v práci a v příloze, je patrné, že takto vzniklé modely věrně odpovídají reálným vodním dílům Vltavské kaskády.

Nelineární model byl lineárně aproximován ve vhodně zvoleném pracovním bodě. Ten byl zvolen tak, aby hladina v nádrži byla co možná nejvyšší. To bylo řešeno tím, že pro výpočet pracovního bodu byla použita průměrná hladina vody v nádrži z dat z povodně 2013. Tím byla získána rovnice pro systém prvního řádu s jedním stabilním pomalým pólem představující dynamiku přehrady.

Dále byl navržen proporcionální regulátor metodou *rootlocusu*, který představuje řízení v režimu objemové regulace. Byl navrhnut tak, aby splňoval požadavky nadřazeného distribučního řízení. Poté byl diskretizován s periodou vzorků $T = 600s$. Na takto vzniklé regulátory bylo vytvořeno distribuční řízení, které představuje centrální dispečink a rozhoduje o dalším nastavení referencí požadovaných objemů na vstup regulátoru.

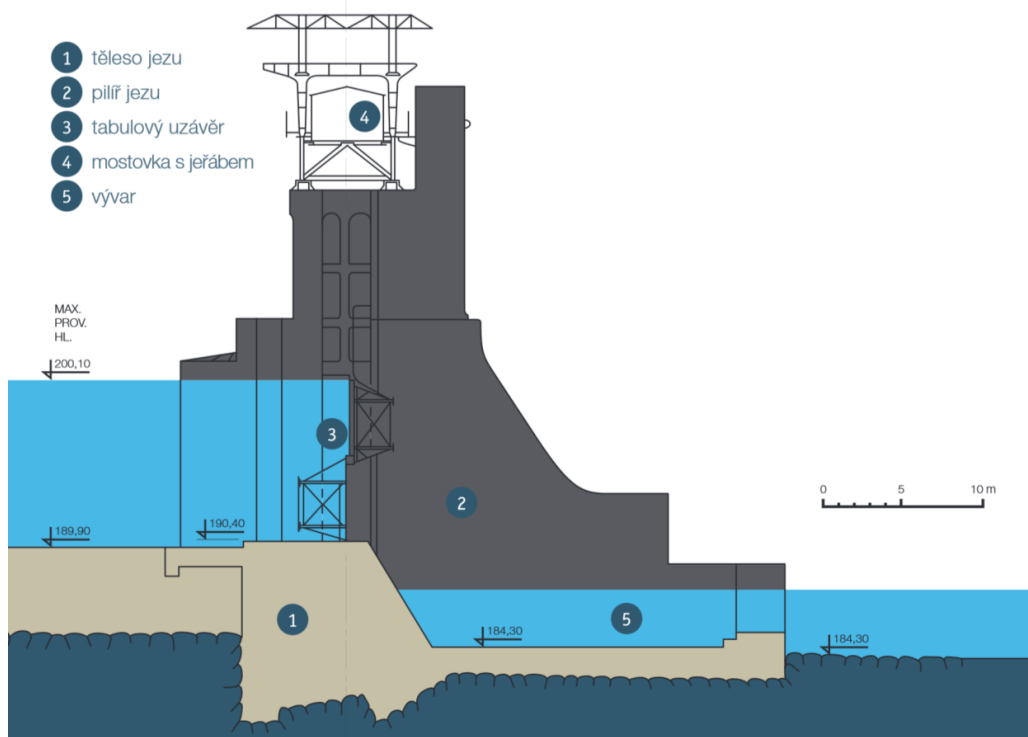
Pro simulaci povodňové vlny na Vltavské kaskády byly použity scénáře. První scénář představoval povodňovou vlnu šířící se od vstupu VD Lipna I po VD Vrané, kde reference

požadovaných objemů byly stanoveny na počáteční velikost objemu a následně na maximální velikost objemu. V prvním případě povodňová vlna pouze protéká Vltavskou kaskádou, kdežto v druhém případě je povodňová vlna zachycována jednotlivými vodními díly Vltavské kaskády. Dále byla provedena simulace distribuovaného řízení s požadovaným kritériem. Nepřesnosti modelu oproti skutečné Vltavské kaskádě mohou být způsobeny rozdílným tvarem přehrady a předpoklady, které jsme uvažovali při tvorbě modelu.

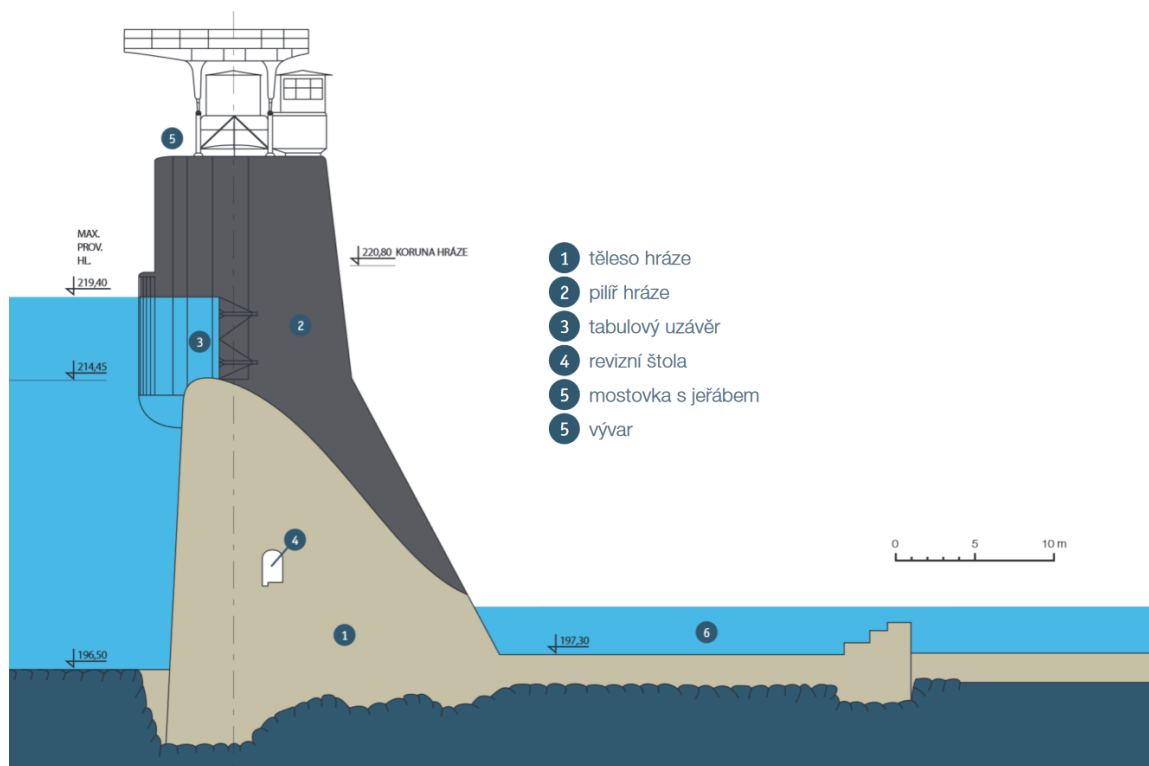
Seznam použité literatury

- [1] Záplavová území. *Povodí Vltavy*. [online]. [2013] [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/zaplavova-uzemi>
- [2] ČERVENÝ, J. *Podnebí a vodní režim ČSSR*. SZN, Praha, 1984.
- [3] Základní charakteristika říční povodně. *Říční povodně*. [online]. [2010] [cit. 2016-05-20] Dostupné z: <http://www.velkawoda.unas.cz/charakteristika.htm>
- [4] KRATOCHVÍL, Stanislav. *Vodní nádrže a přehrady*. Praha: Nakladatelství Čsl. akademie věd, 1961. Československá akademie věd. Sekce technická.
- [5] Hladiny vody v nádržích. *Povodí Vltavy*. [online]. [2016] [cit. 2016-05-15] Dostupné z: <http://www.pvl.cz/portal/Nadrze/cz/pc/Objemy.aspx?data=1>
- [6] Princip fungování vodních elektráren. *Skupina CEZ*. [online]. [2016] [cit. 2016-05-15] Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/flash-model-jak-funguje-vodni-elektrarna.html>
- [7] Přečerpávací vodní elektrárna. *O energetice*. [online]. [3.3.2015] [cit. 2016-05-20] Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/>
- [8] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [9] KREDBA, Miloš. *Vltavská kaskáda*. Praha: Min. lesního a vodního hosp., 1969.
- [10] Vodní elektrárny ČEZ v České republice. *Skupina CEZ*. [online]. [2016] [cit. 2016-04-15] Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektreny-cez/ceska-republika.html>
- [11] Povodí Vltavy. *Vodní díla a nádrže*. [online]. [2013] [cit. 2016-03-15] Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>
- [12] HRÁDEK, František; KUŘÍK, Petr *Hydrologie*. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2002. ISBN 80-213-0950-4.
- [13] KEMÉNYOVÁ, Zuzana. Petr Kubala: Připravíme přehradu Orlík na desetitisíciletou vodu *Hospodářské noviny*. [online]. [10.12.2012] [cit. 2016-05-09] Dostupné z: Dostupné z: <http://archiv.ihned.cz/c1-58936270-petr-kubala-pripravime-prehradu-orlik-na-desetitisciletou-vodu>
- [14] BROWN, Forbes T. *Engineering system dynamics: a unified graph-centered approach*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007. ISBN 978-0-8493-9648-9.
- [15] MARQUARDT, D. *An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters*. SIAM Journal Applied Mathematics, Vol. 11, 1963, pp. 431–441.

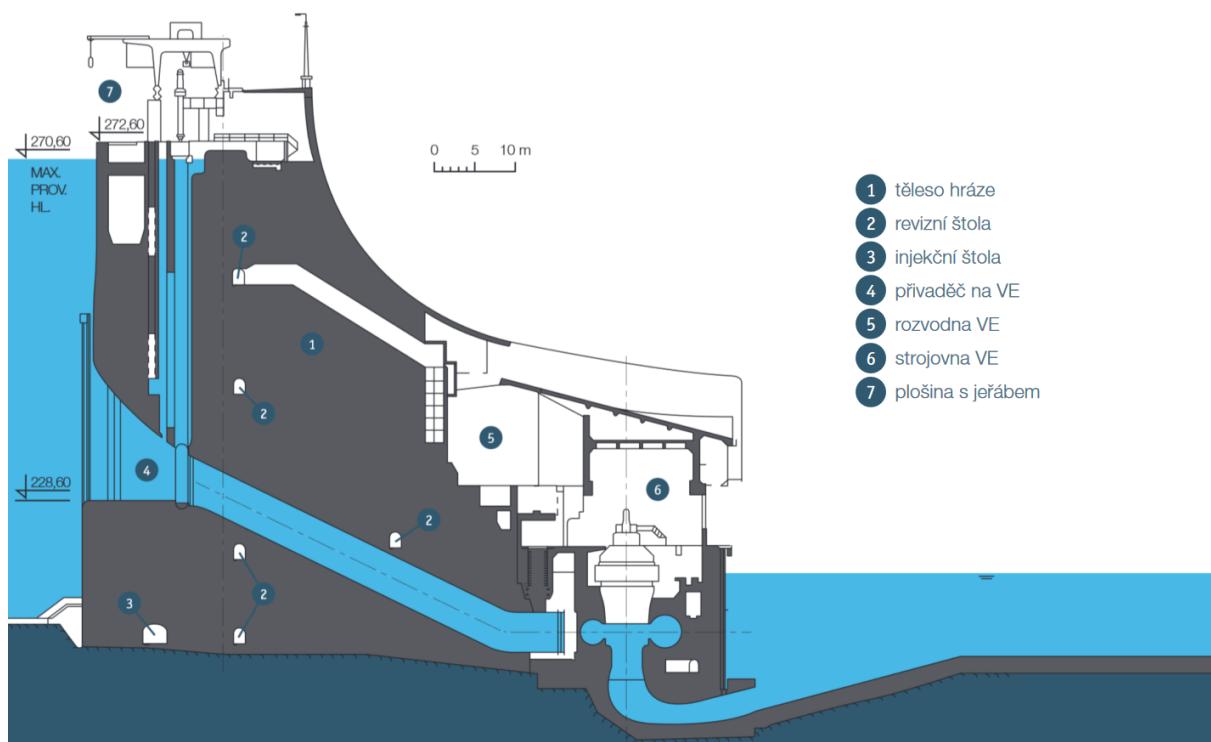
A. Náskresy VD Vltavské kaskády



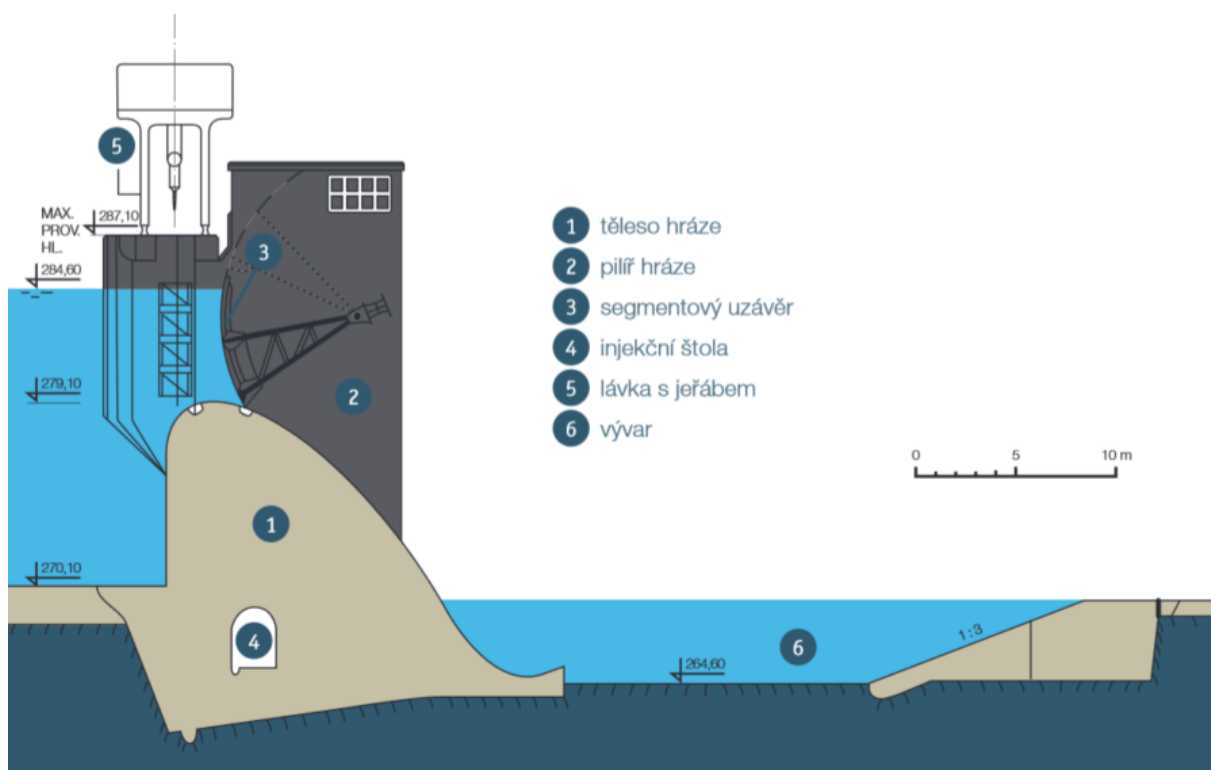
Obrázek A.1: VD Vrané [11]



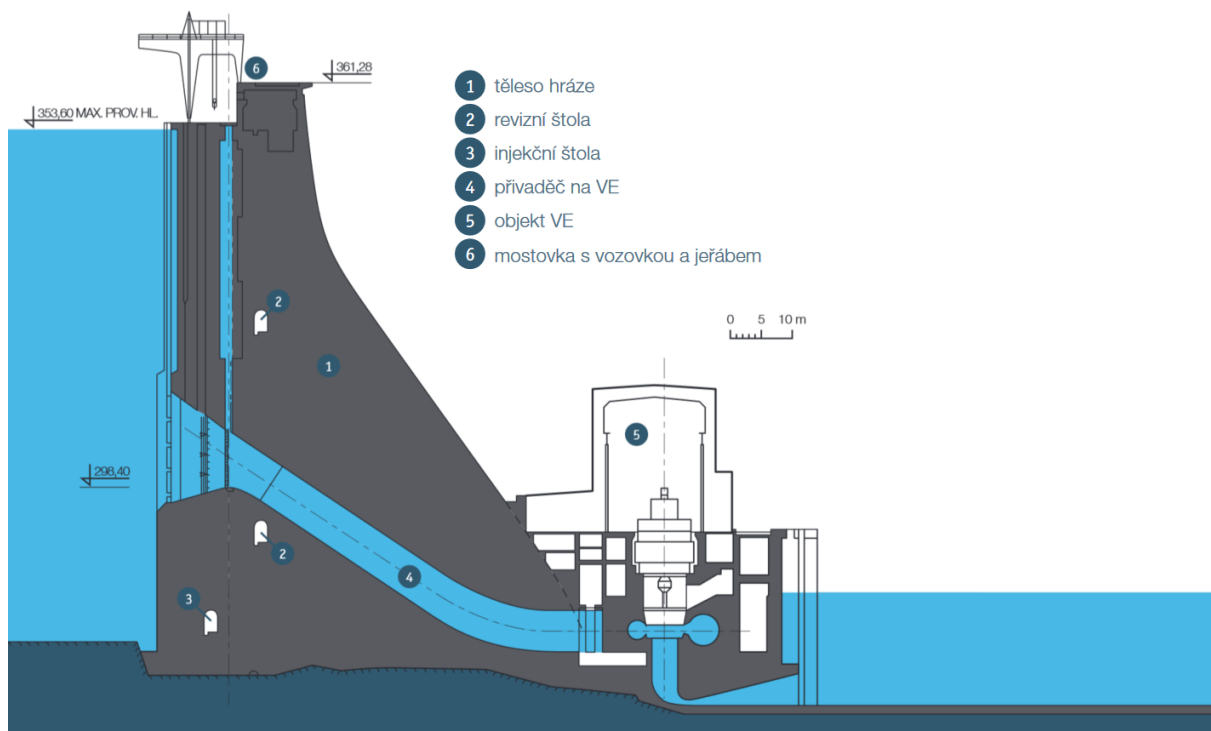
Obrázek A.2: VD Štěchovice [11]



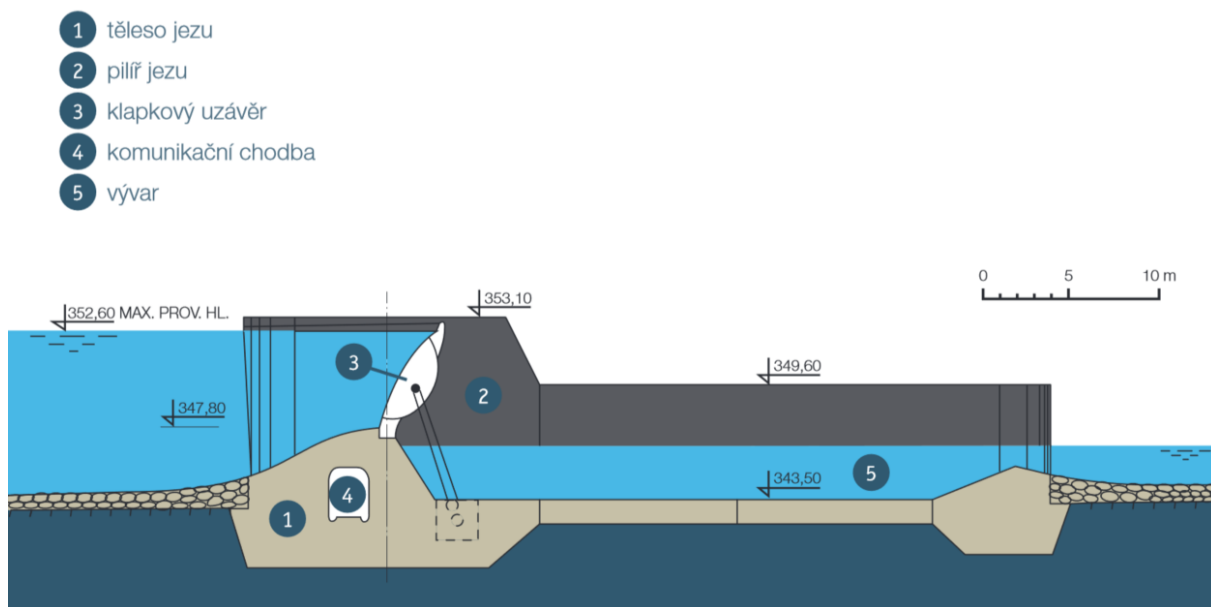
Obrázek A.3: VD Slapy [11]



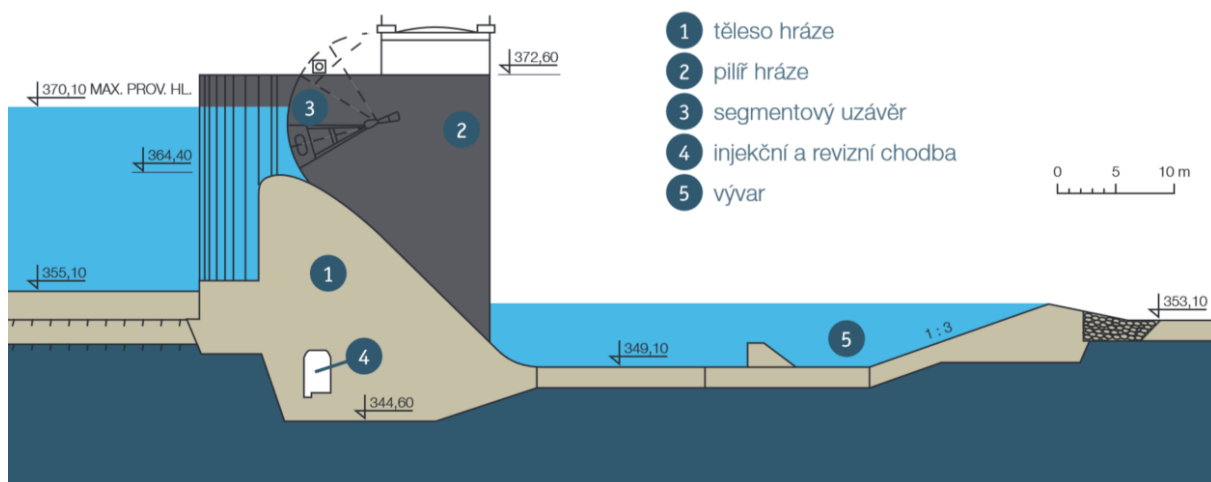
Obrázek A.4: VD Kamýk [11]



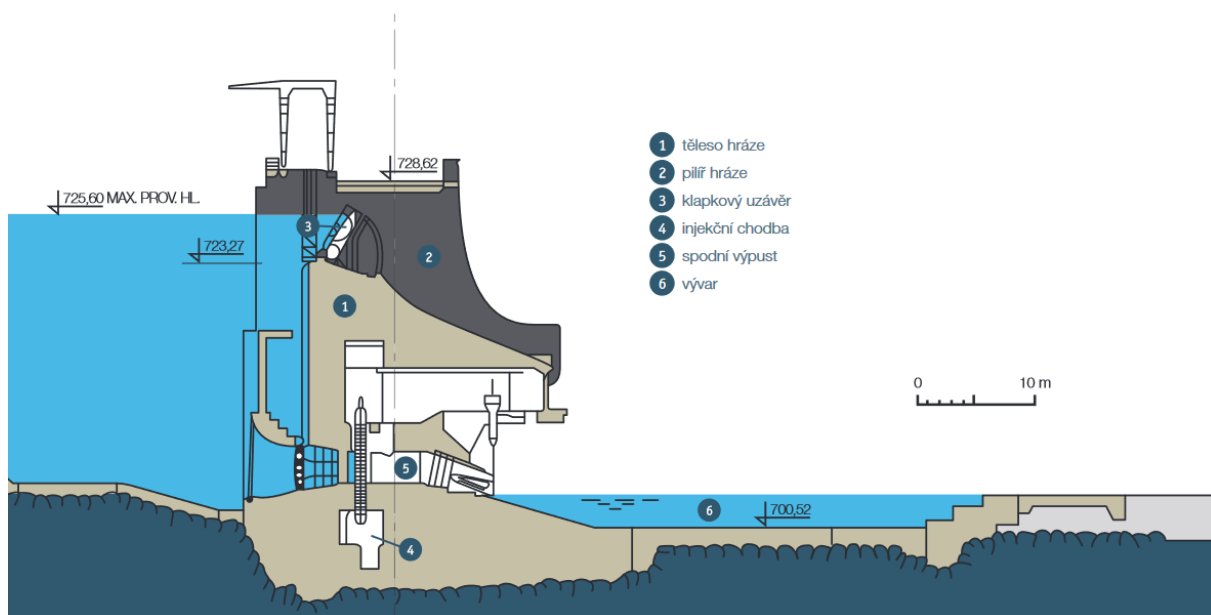
Obrázek A.5: VD Orlík [11]



Obrázek A.6: VD Kořensko [11]

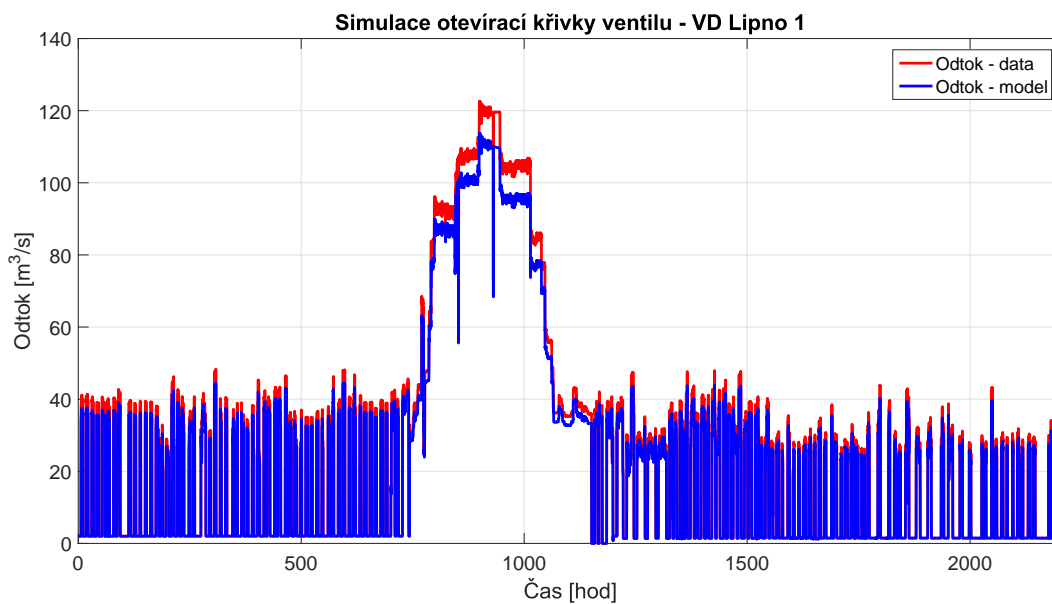


Obrázek A.7: VD Hněvkovice [11]

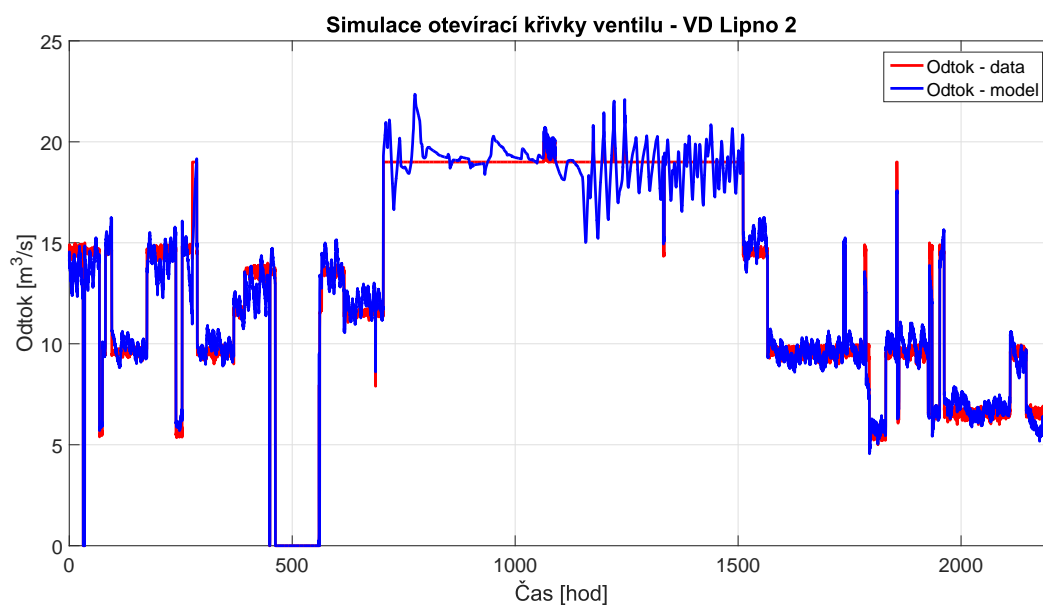


Obrázek A.8: VD Lipno I [11]

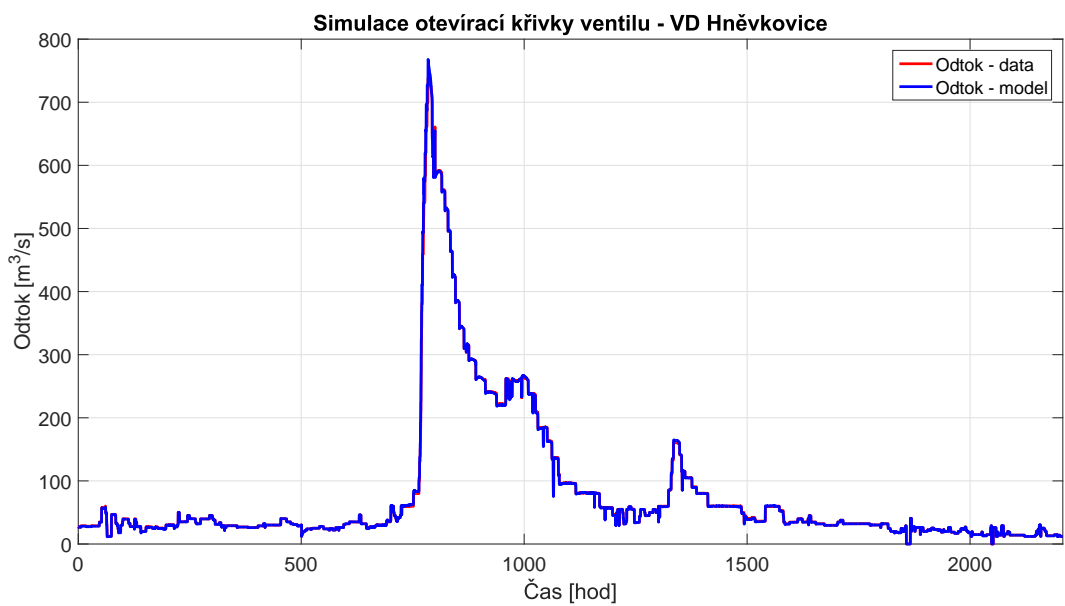
B. Simulace funkčnost otevíracích křivek VD



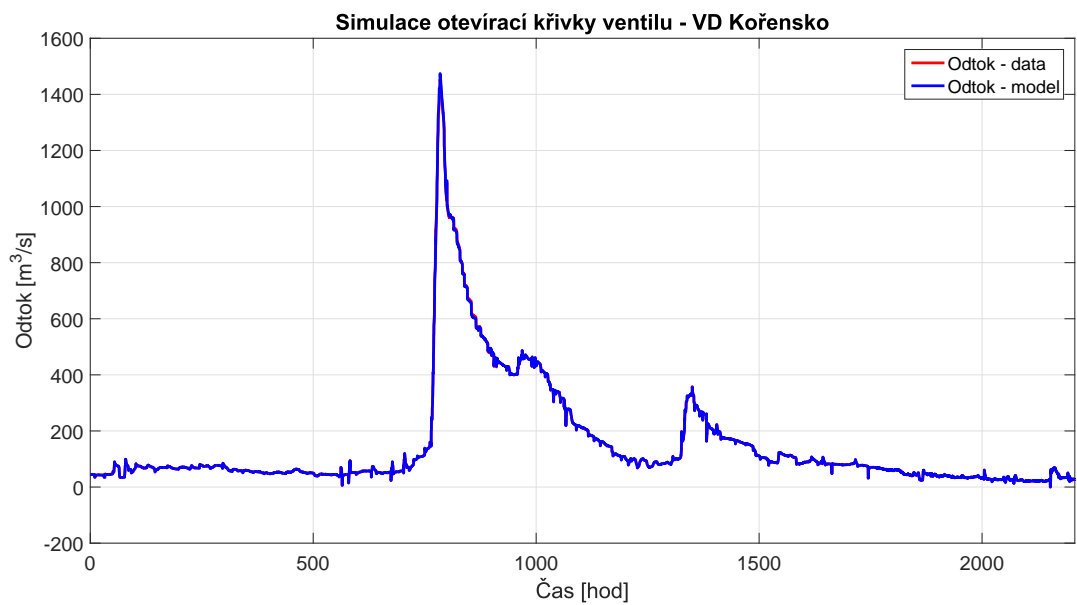
Obrázek B.1: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Lipno I



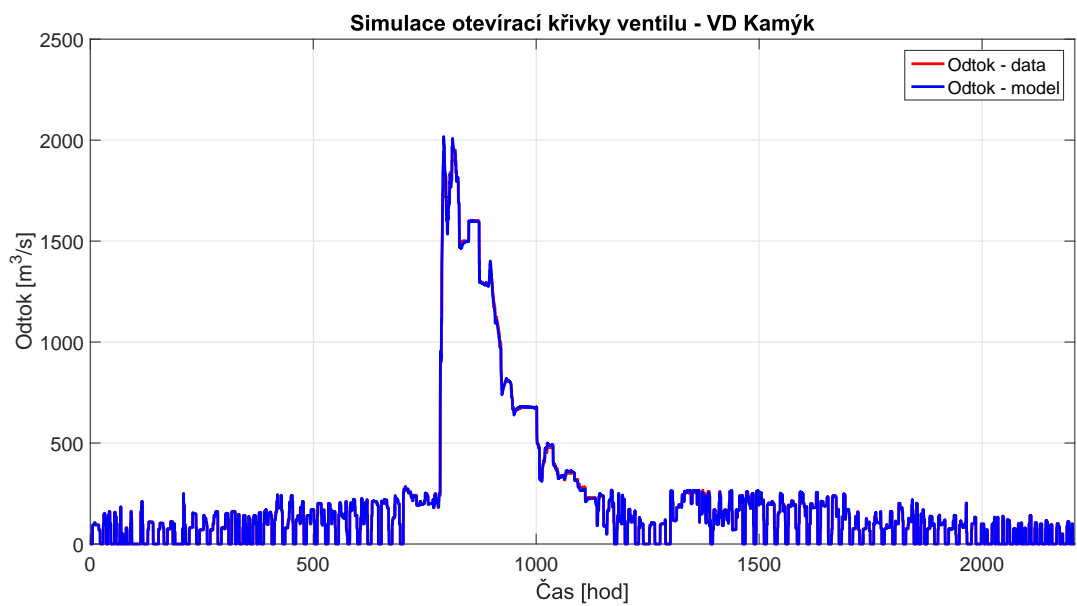
Obrázek B.2: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Lipno II



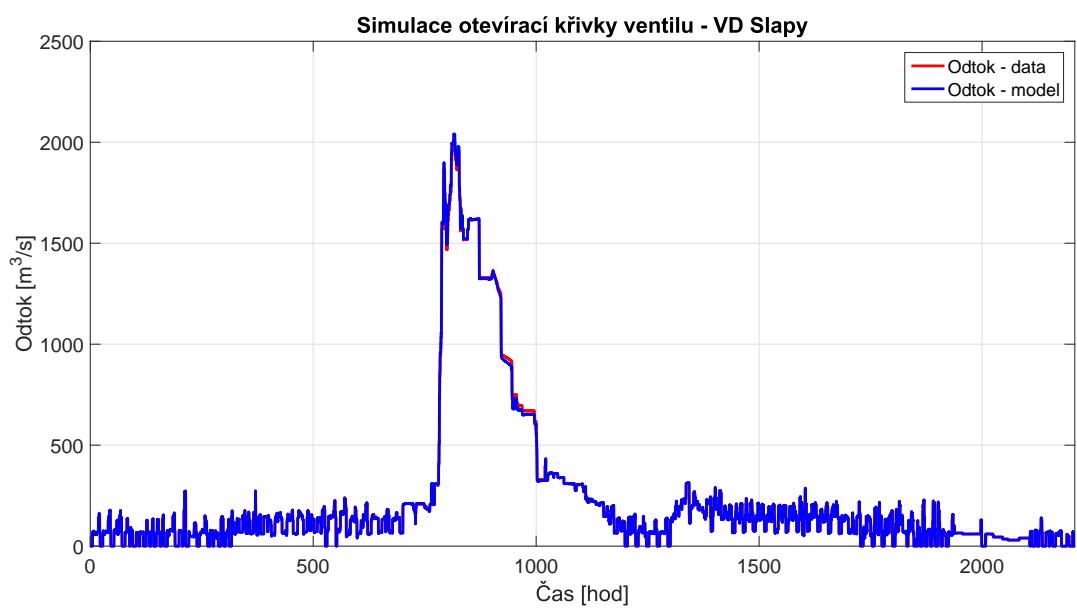
Obrázek B.3: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Hněvkovice



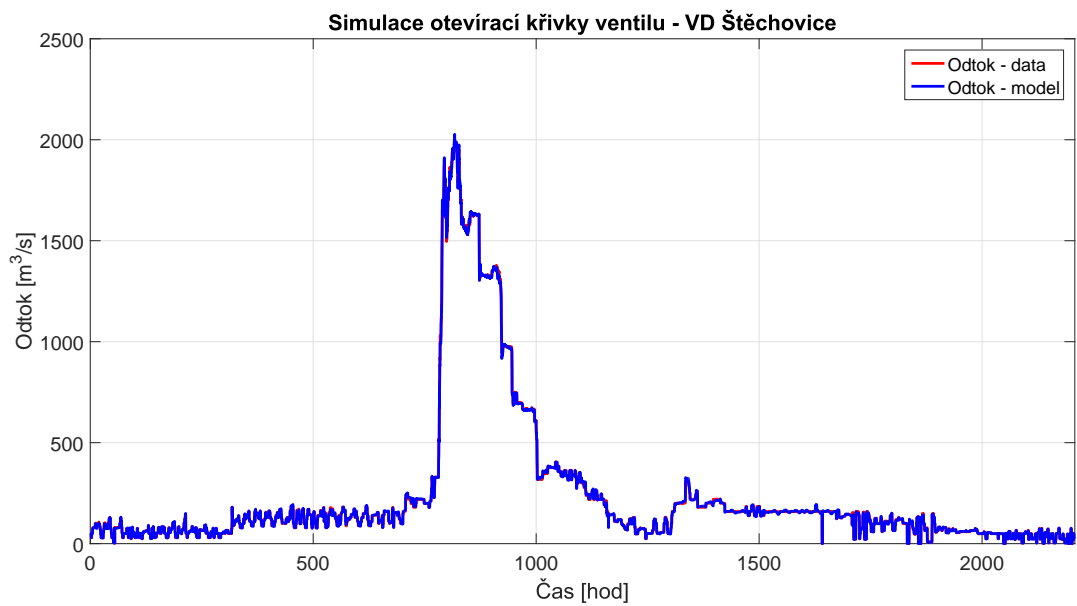
Obrázek B.4: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Kořensko



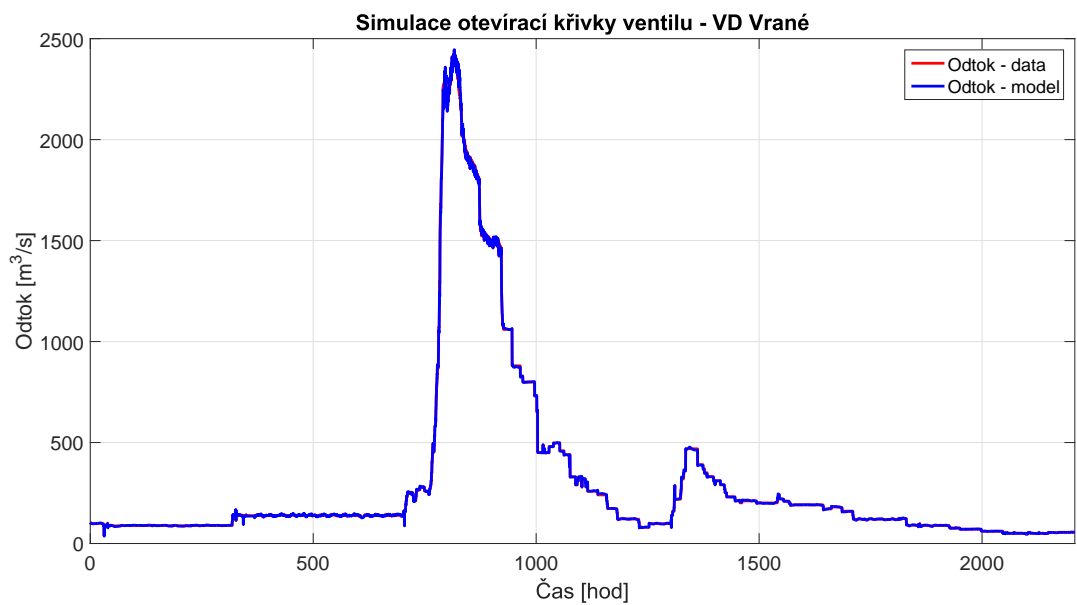
Obrázek B.5: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Kamýk



Obrázek B.6: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Slapy

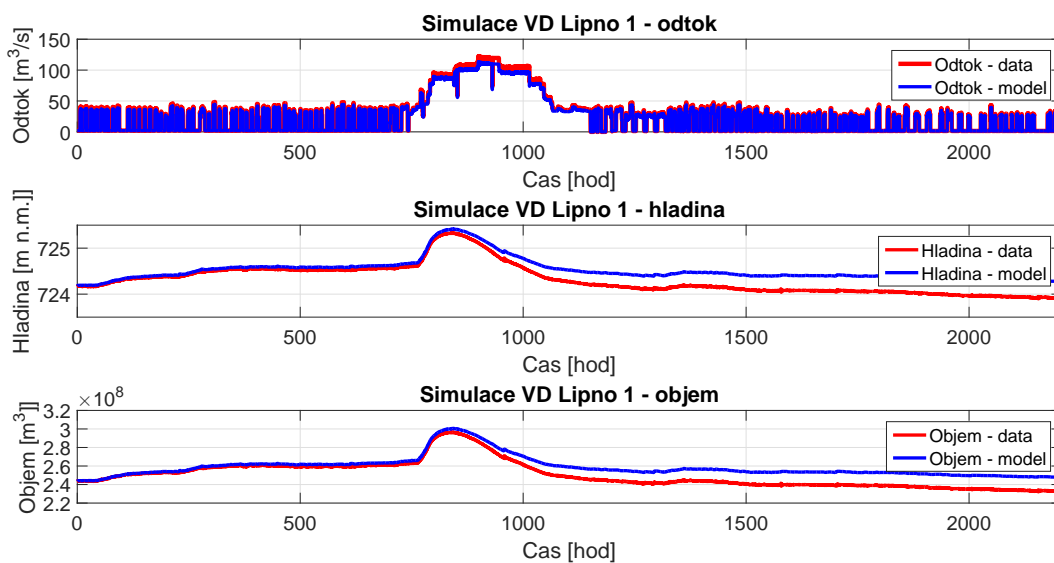


Obrázek B.7: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Štěchovice

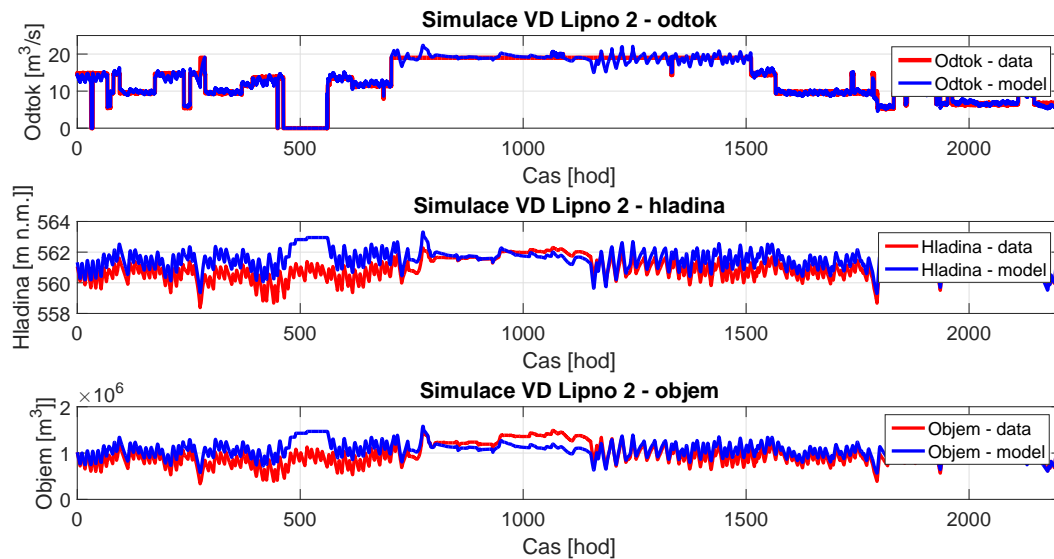


Obrázek B.8: Simulace funkčnosti otevírací křivky VD Vrané

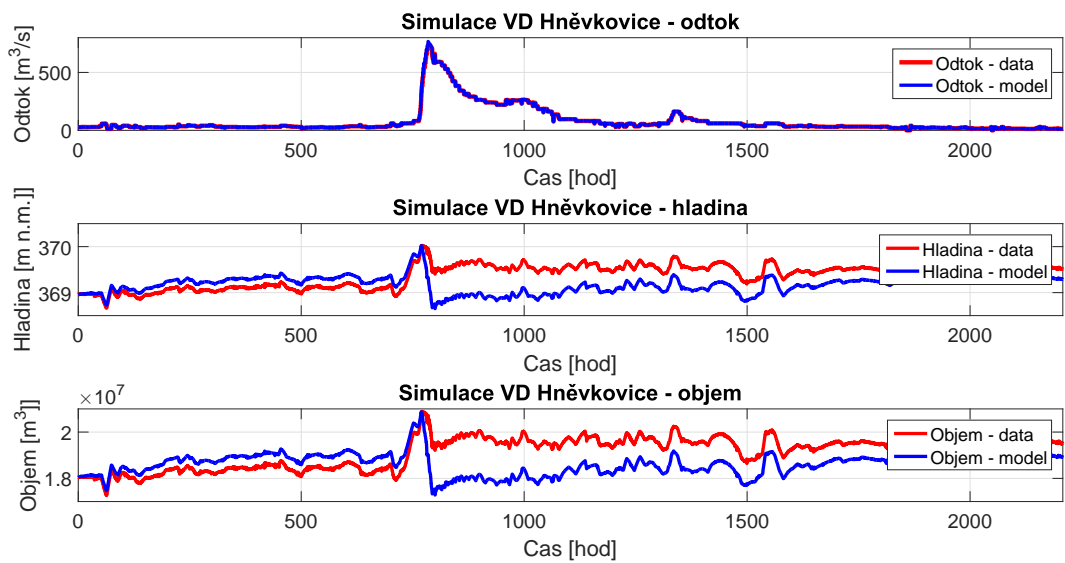
C. Simulace matematických modelů VD



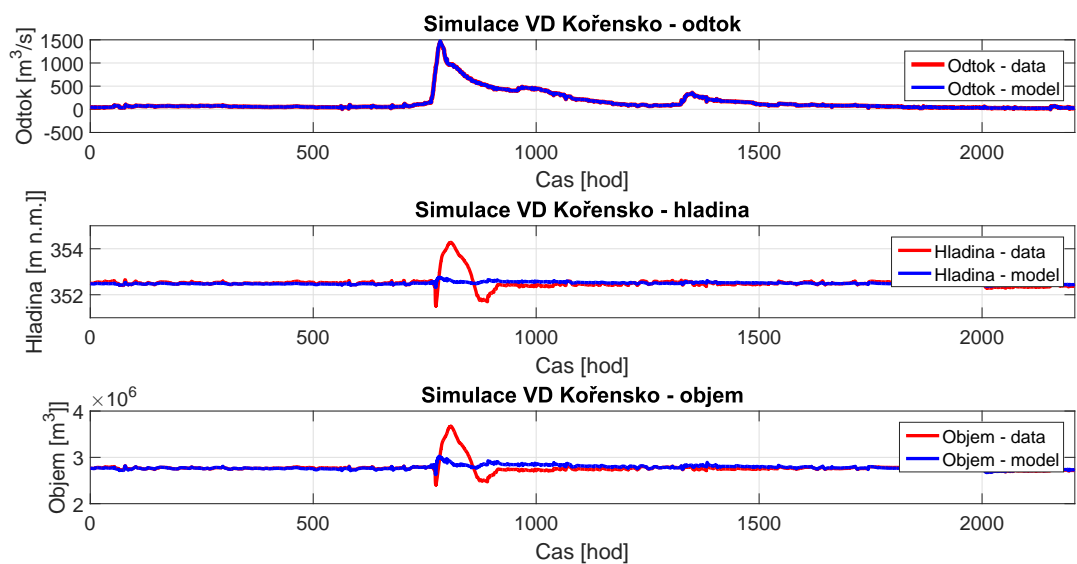
Obrázek C.1: Simulace VD Lipno I



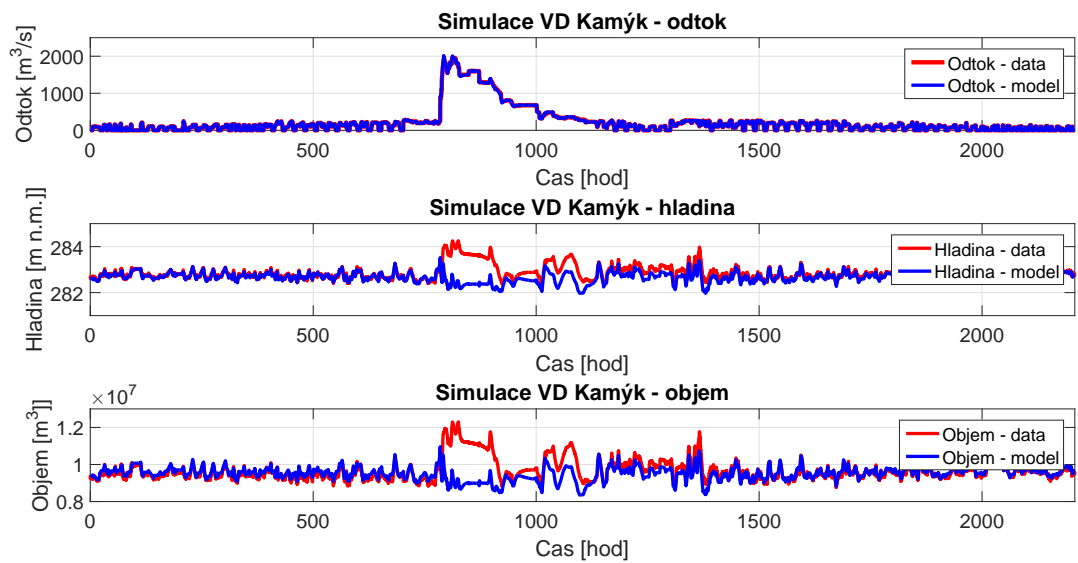
Obrázek C.2: Simulace VD Lipno II



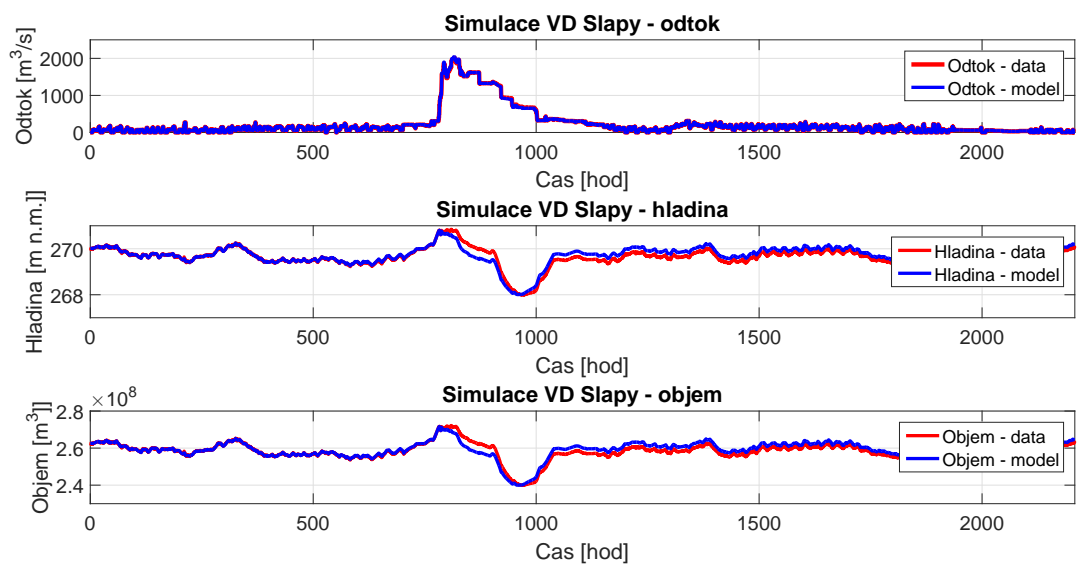
Obrázek C.3: Simulace VD Hněvkovice



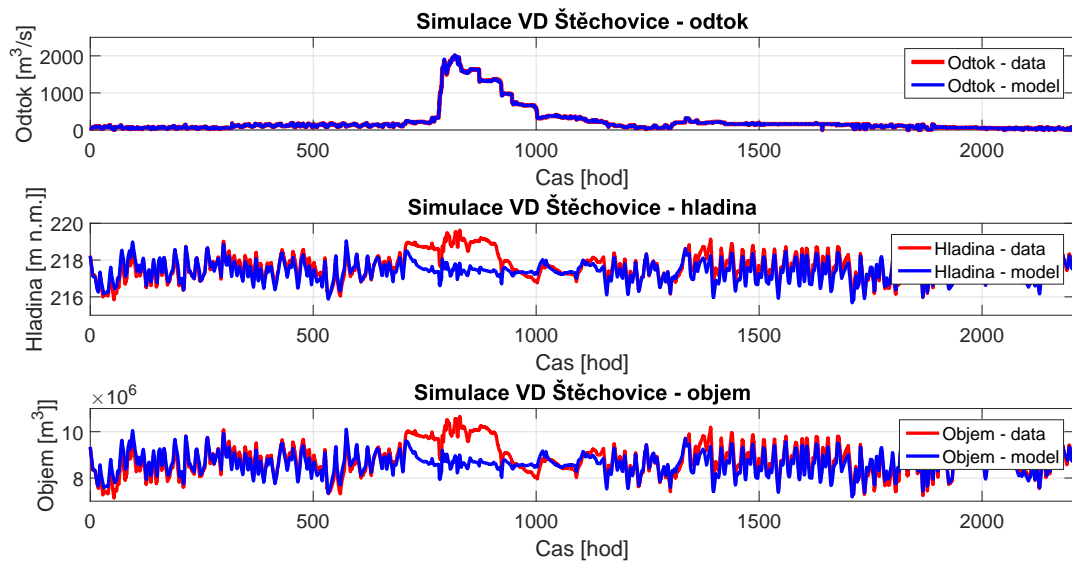
Obrázek C.4: Simulace VD Kořensko



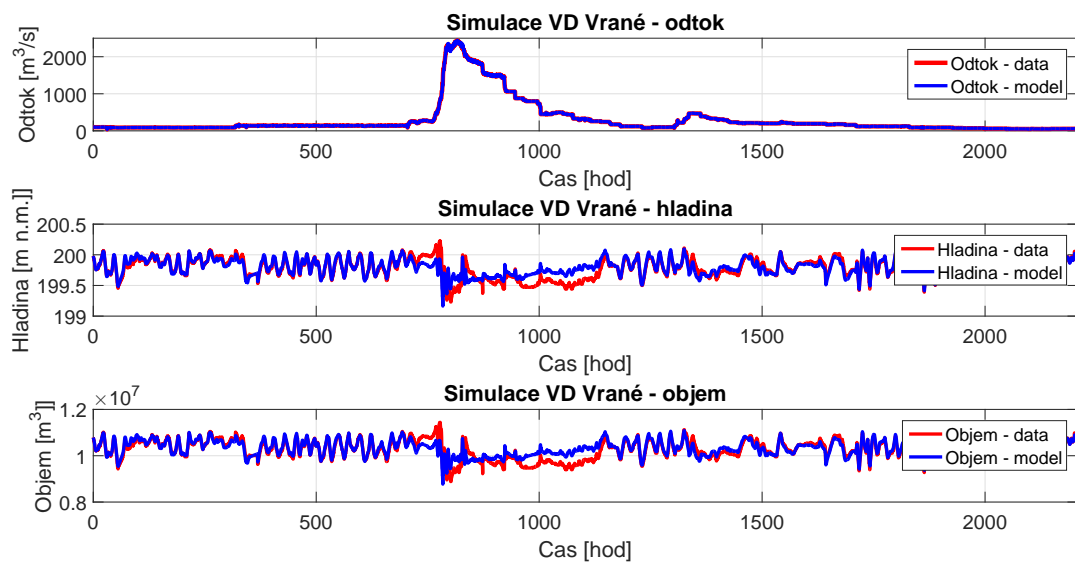
Obrázek C.5: Simulace VD Kamýk



Obrázek C.6: Simulace VD Slapy

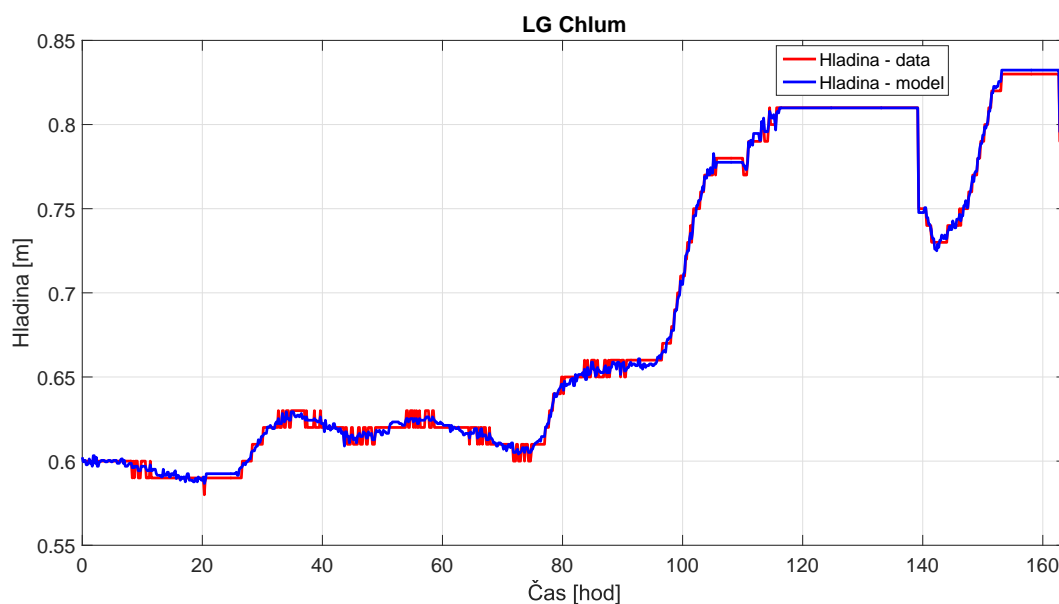


Obrázek C.7: Simulace VD Štěchovice

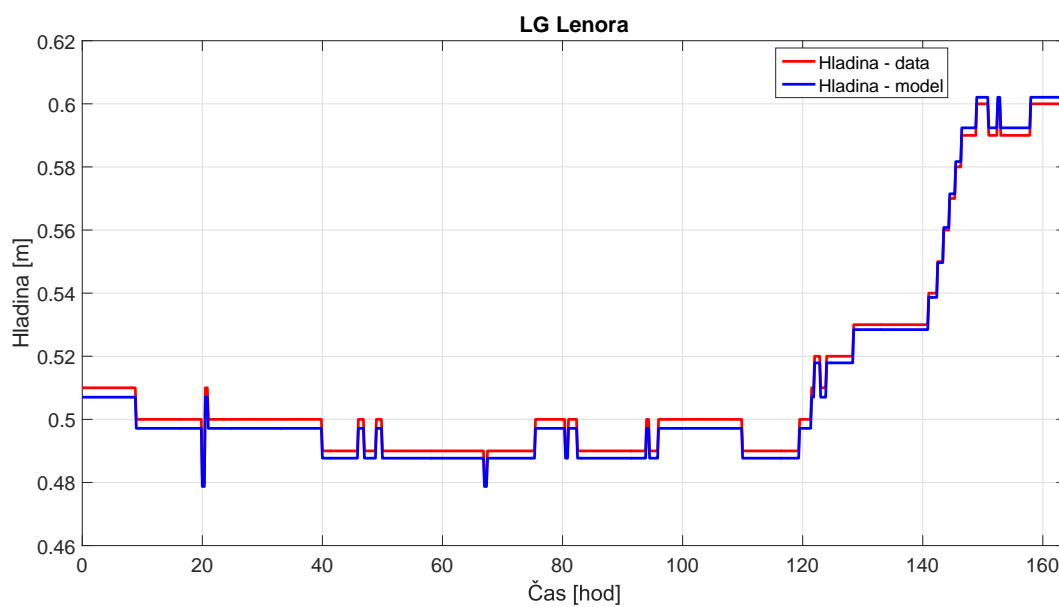


Obrázek C.8: Simulace VD Vrané

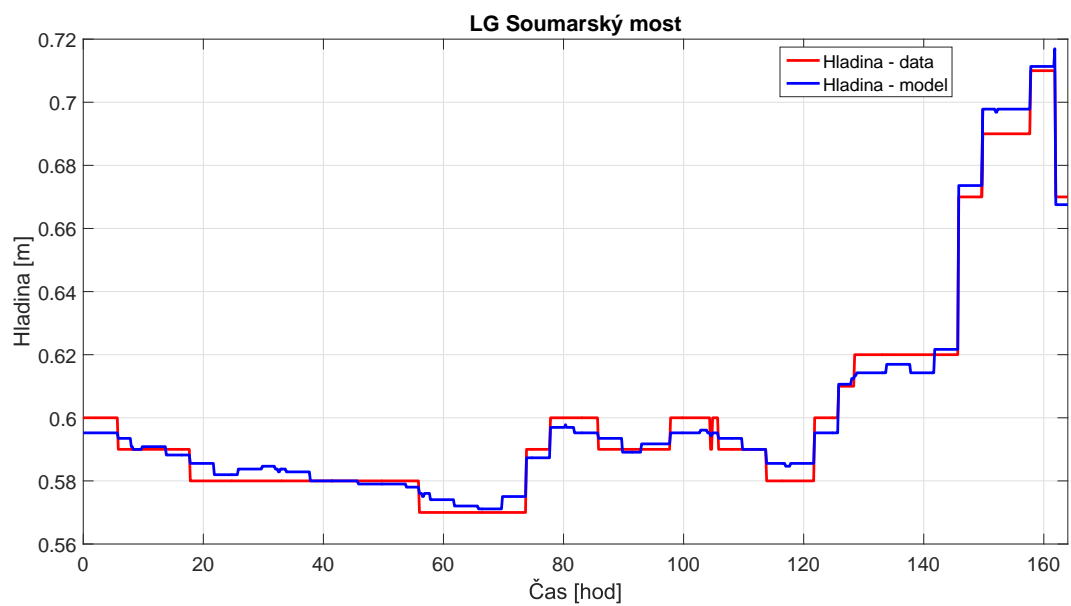
D. Simulace konzumčních křivek limnigrafů



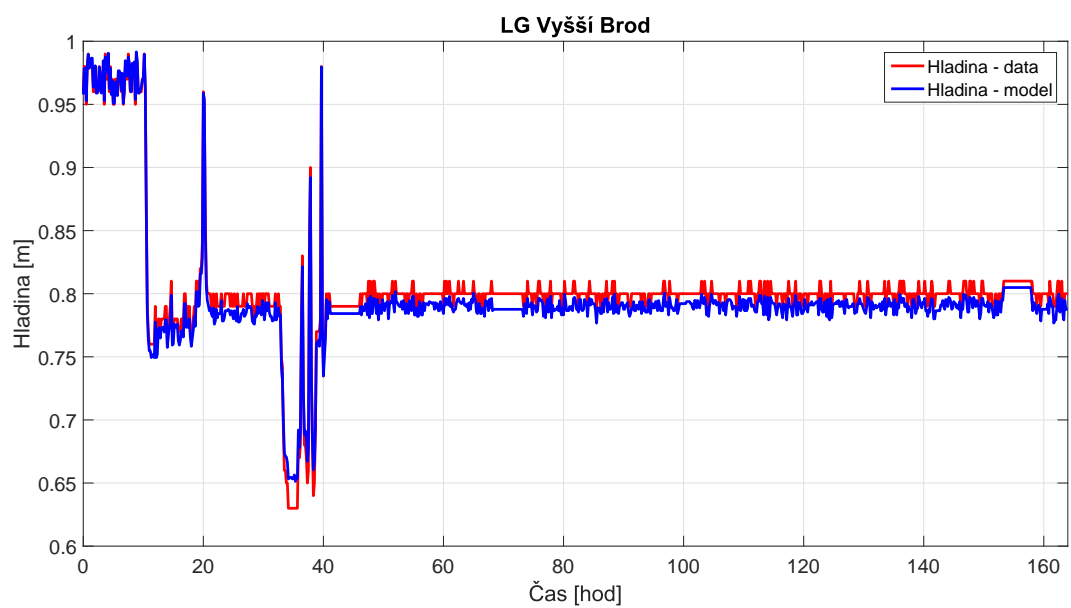
Obrázek D.1: Simulace LG Chlum



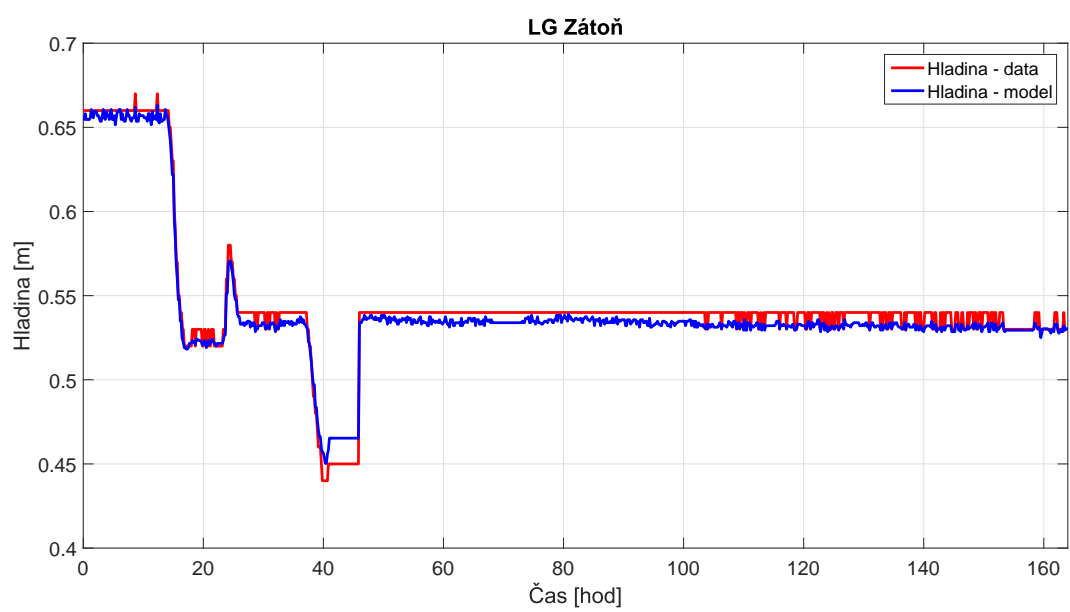
Obrázek D.2: Simulace LG Lenora



Obrázek D.3: Simulace LG Soumarský most

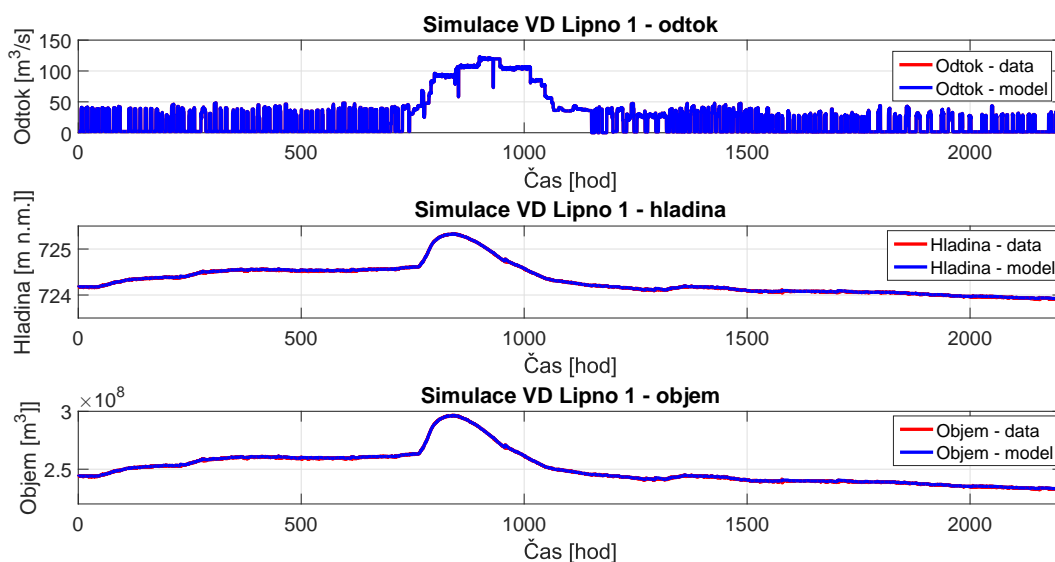


Obrázek D.4: Simulace LG Vyšší Brod

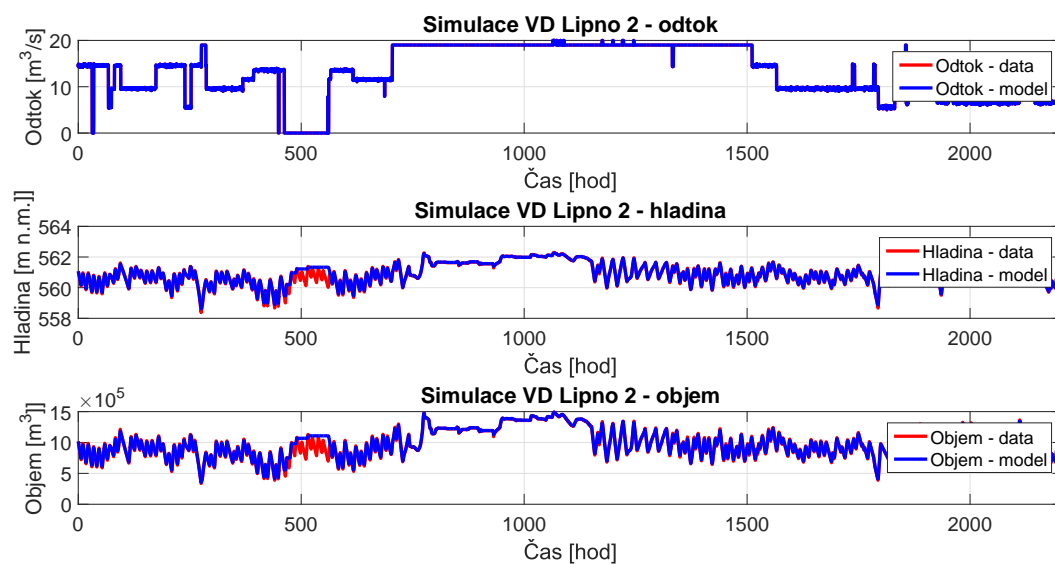


Obrázek D.5: Simulace LG Zátň

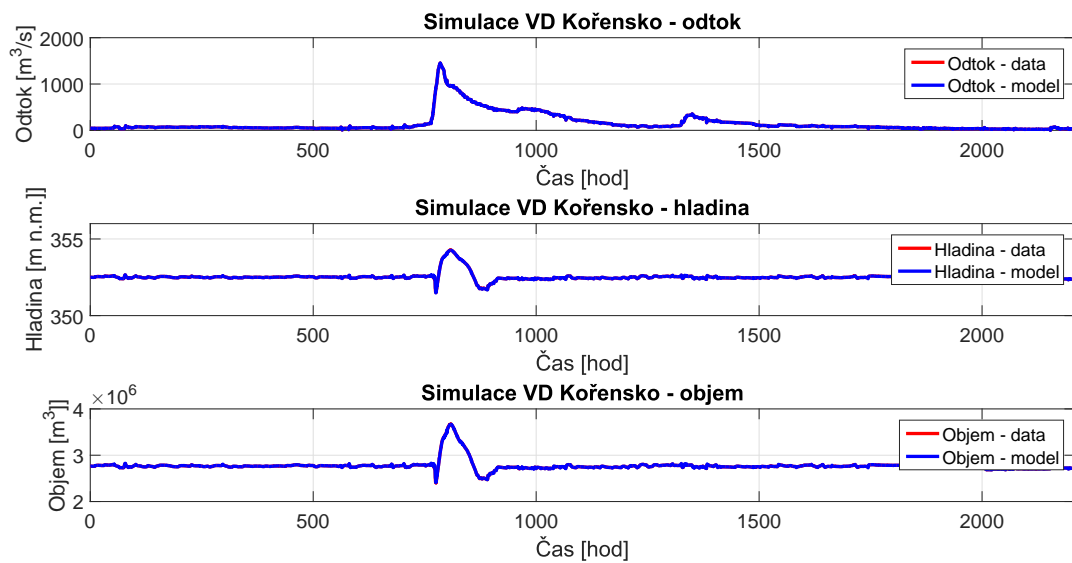
E. Simulace optimalizovaných modelů VD



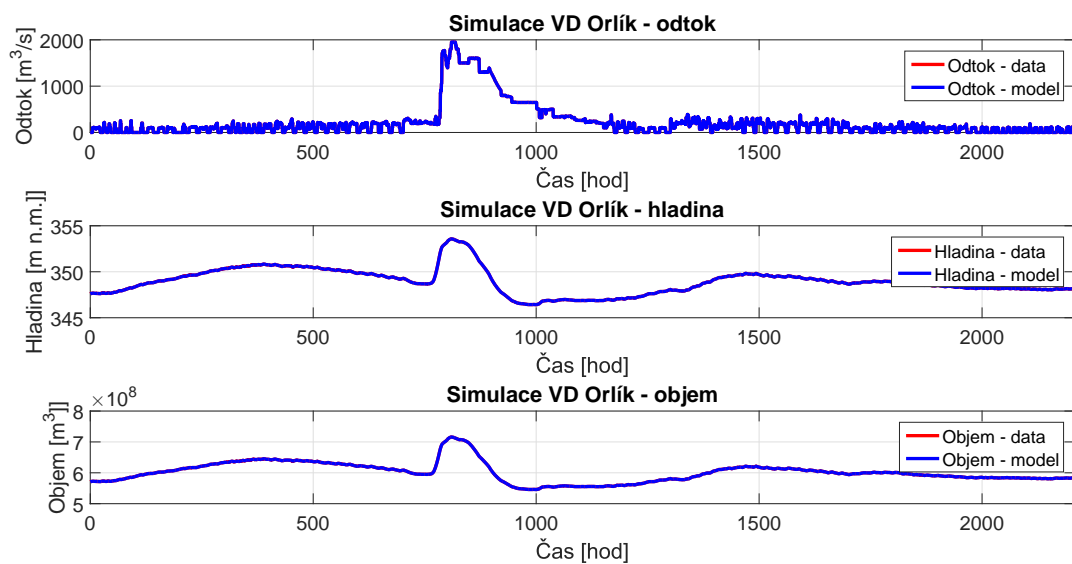
Obrázek E.1: Simulace VD Lipno I



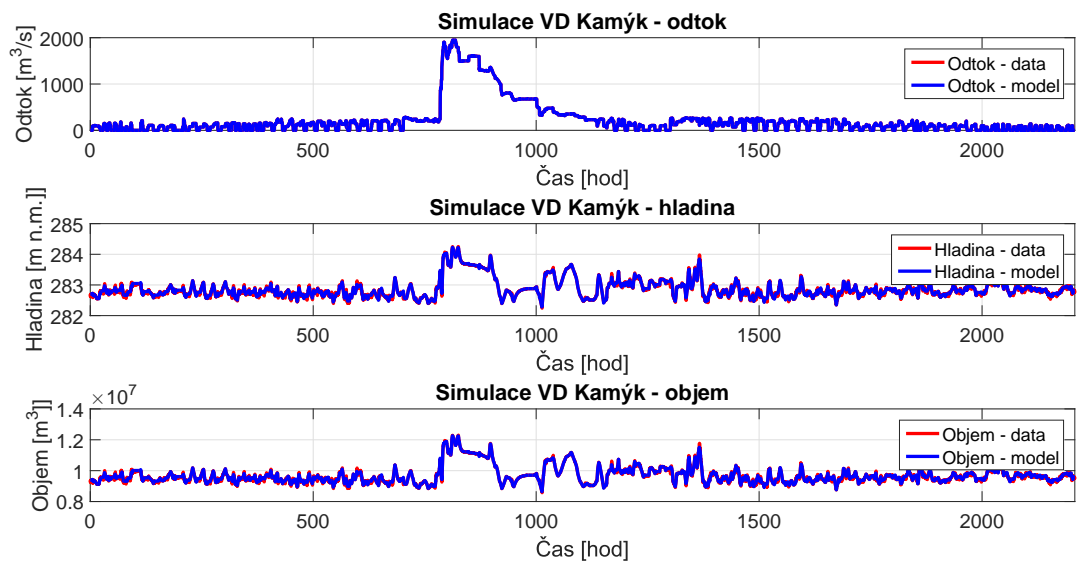
Obrázek E.2: Simulace VD Lipno II



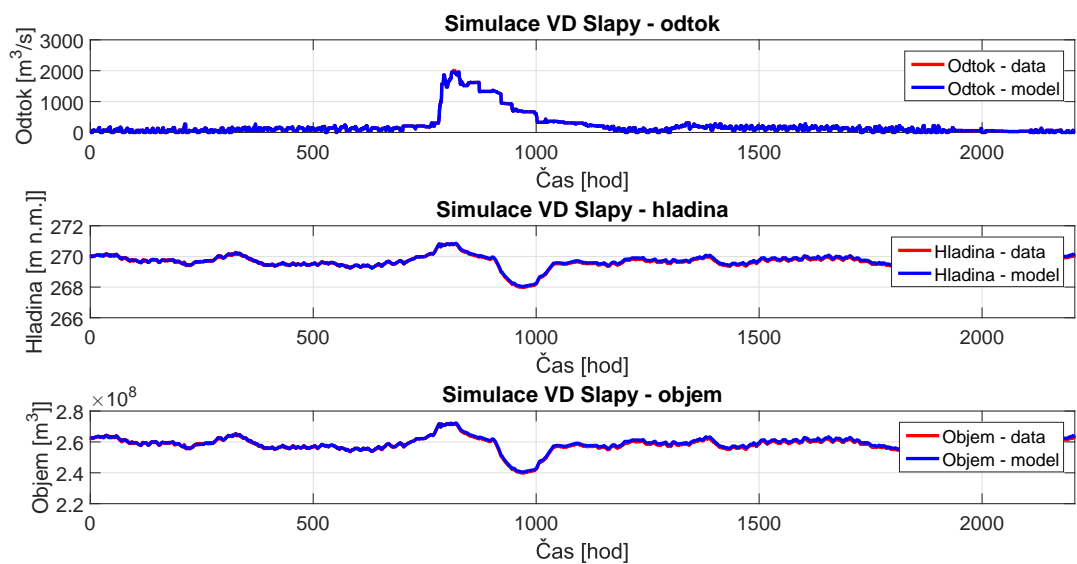
Obrázek E.3: Simulace VD Kořensko



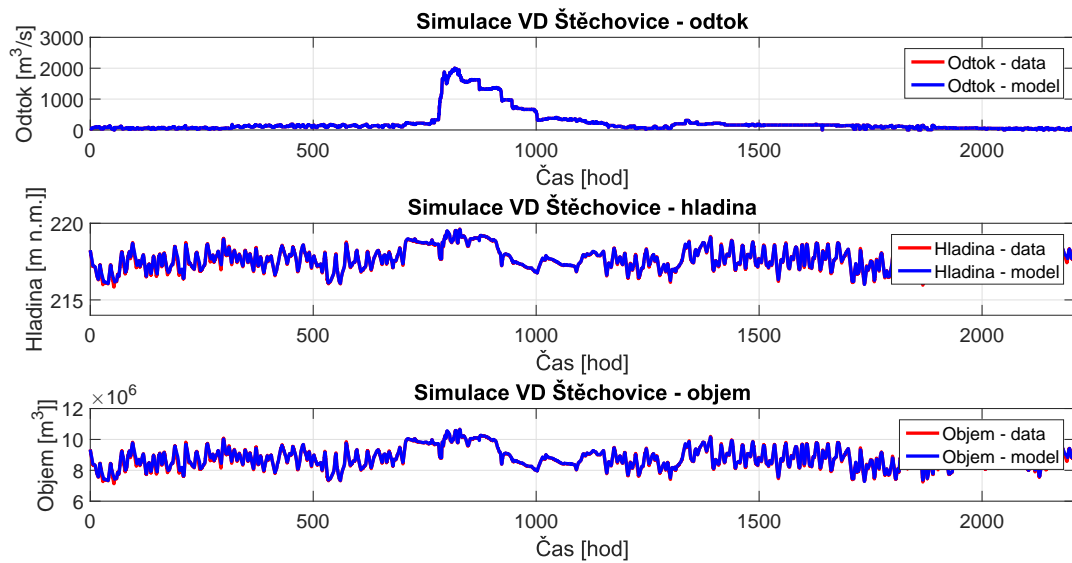
Obrázek E.4: Simulace VD Orlík



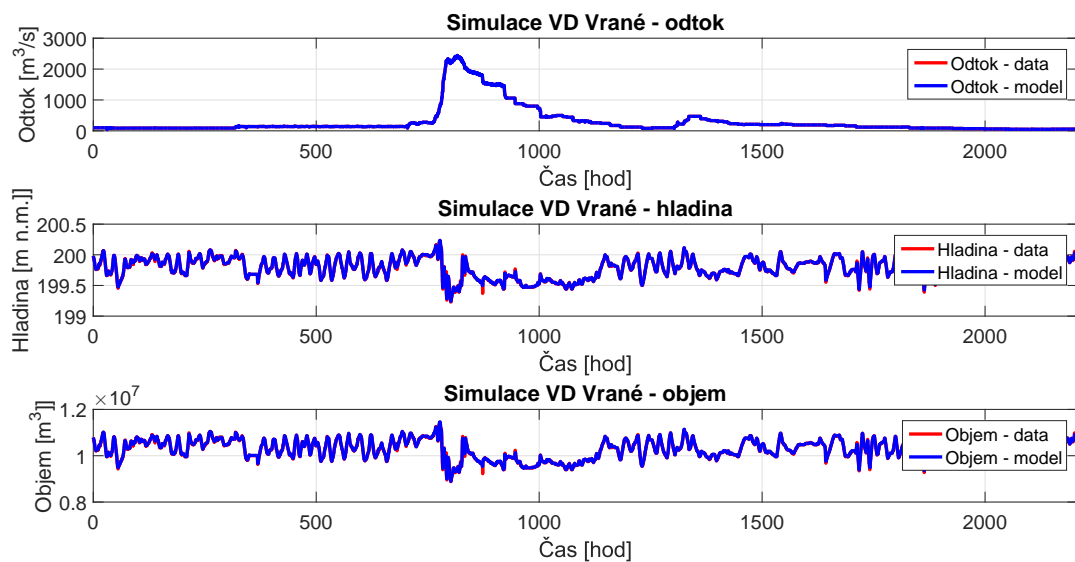
Obrázek E.5: Simulace VD Kamýk



Obrázek E.6: Simulace VD Slapy



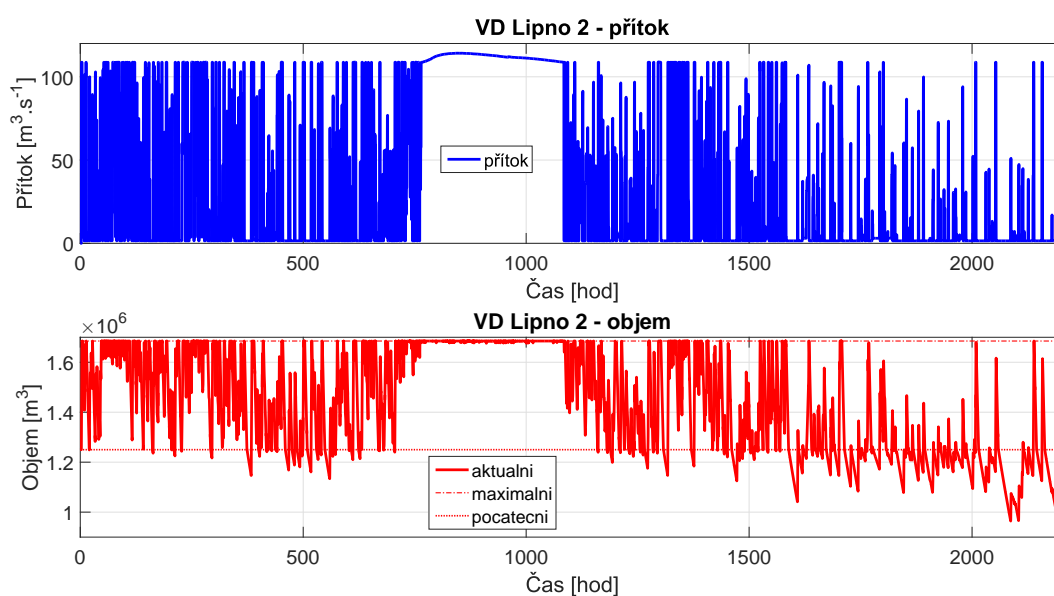
Obrázek E.7: Simulace VD Štěchovice



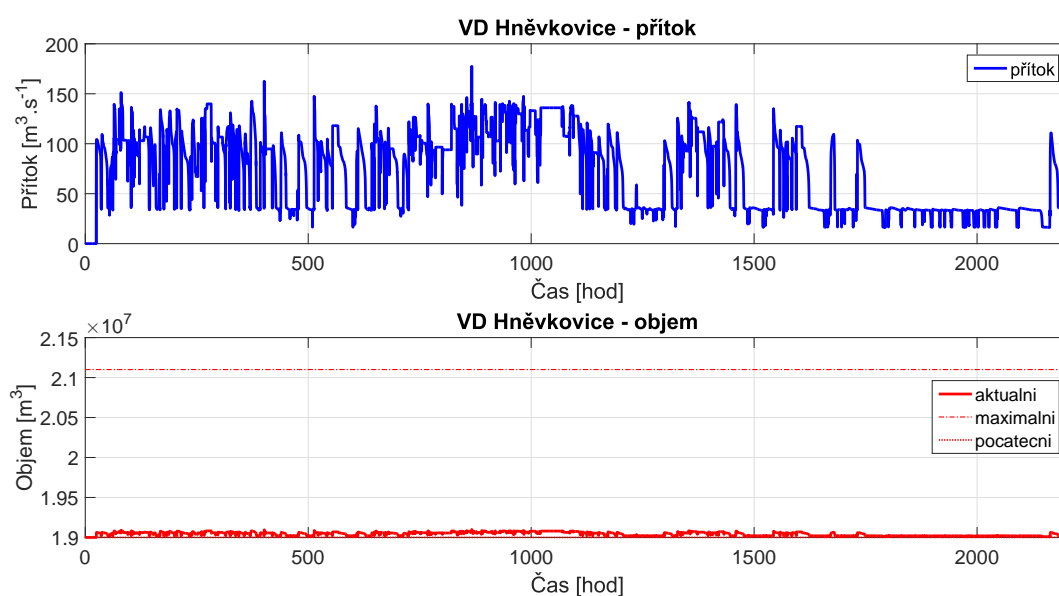
Obrázek E.8: Simulace VD Vrané

F. Simulace a řízení v režimu objemové regulace

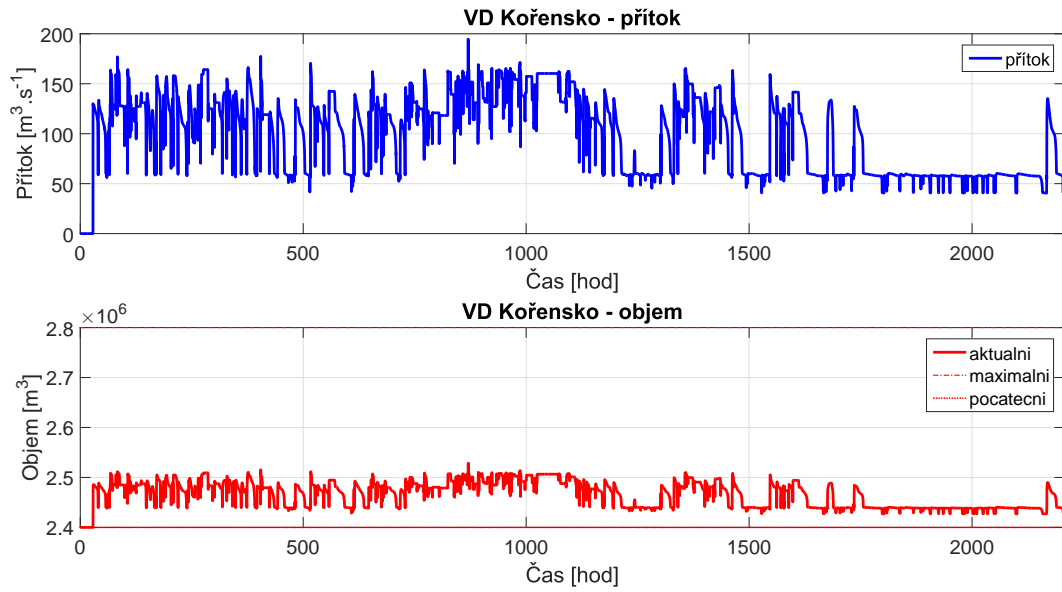
F.1 Referenční hodnota je počáteční velikost objemu



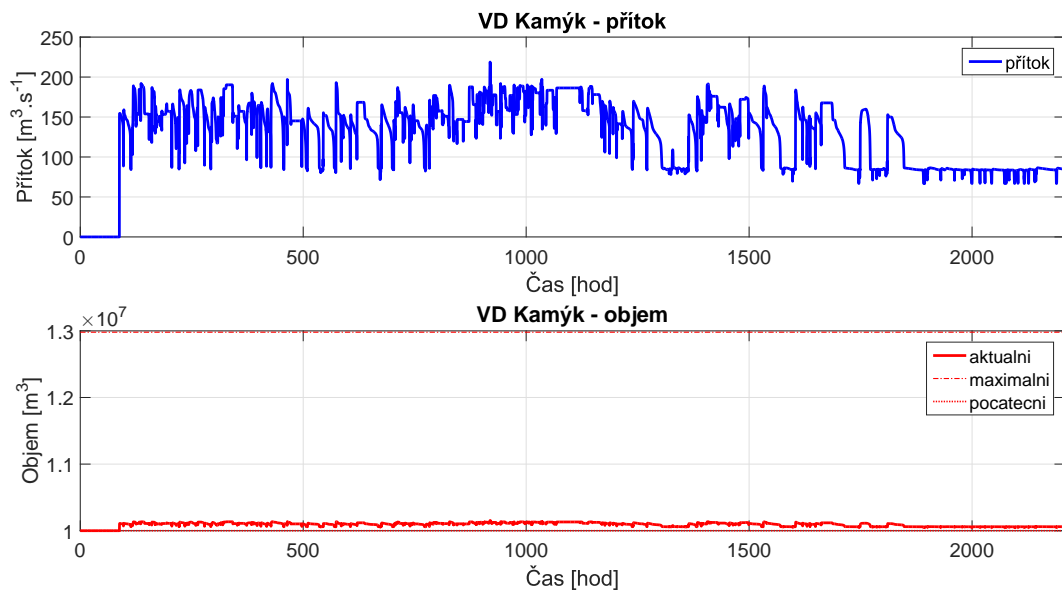
Obrázek F.1: Režim objemové regulace I pro Lipno II



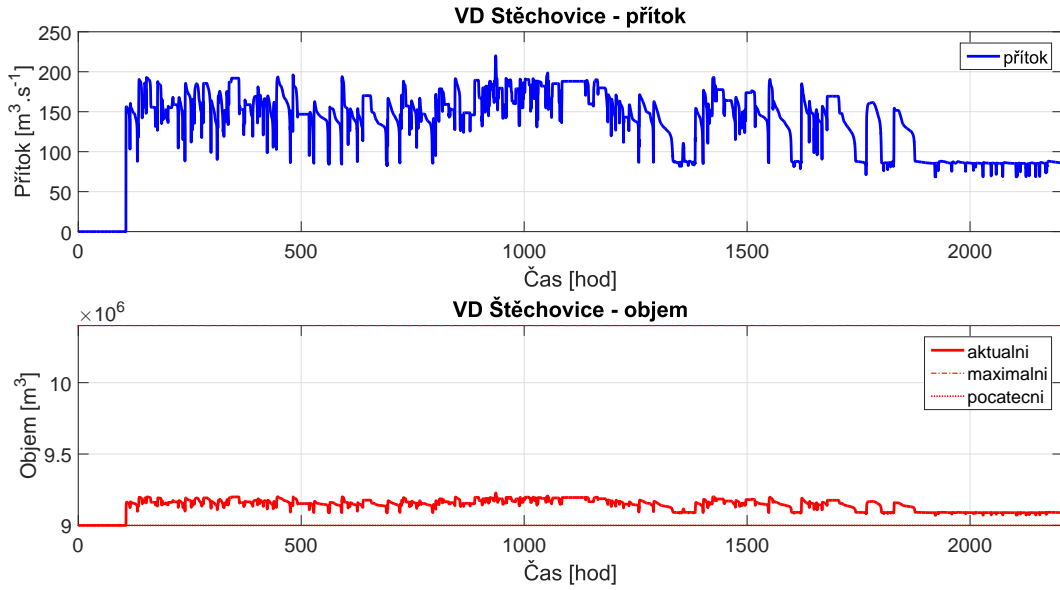
Obrázek F.2: Režim objemové regulace I pro Hněvkovice



Obrázek F.3: Režim objemové regulace I pro Kořensko

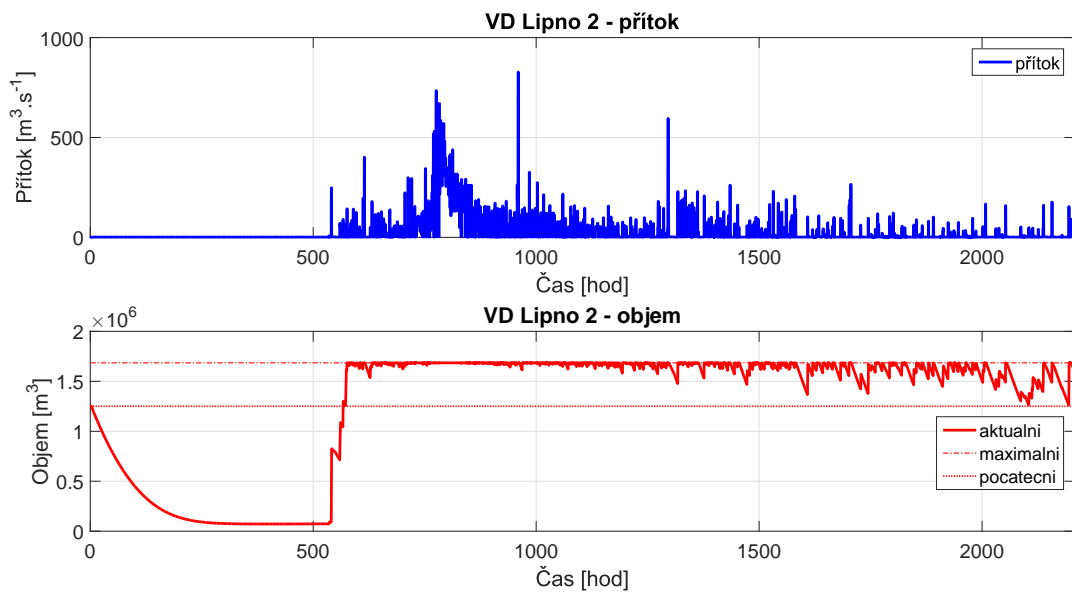


Obrázek F.4: Režim objemové regulace I pro Kamýk

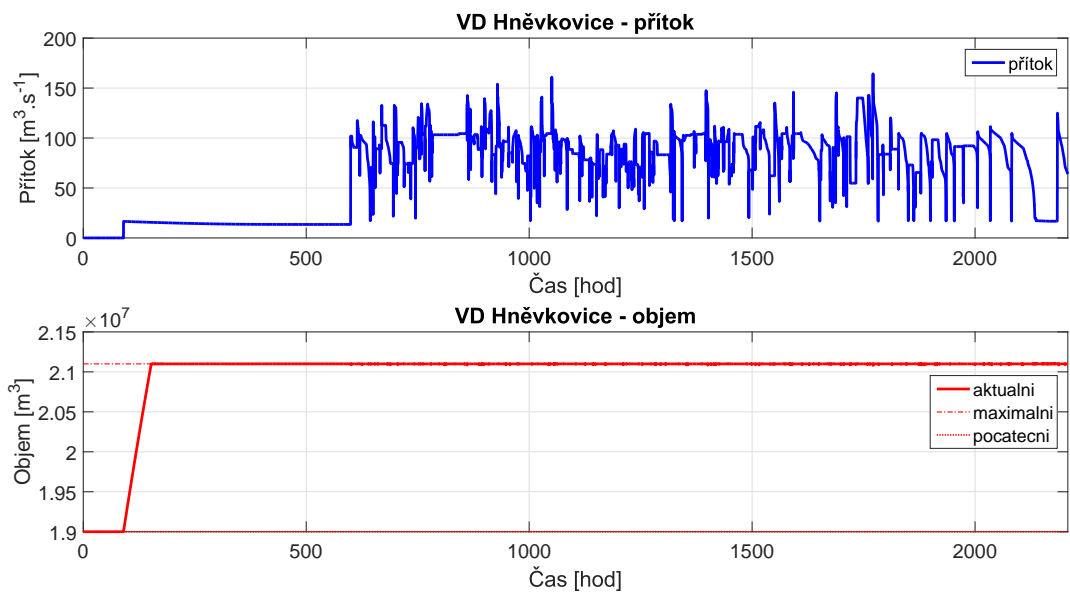


Obrázek F.5: Režim objemové regulace I pro Štěchovice

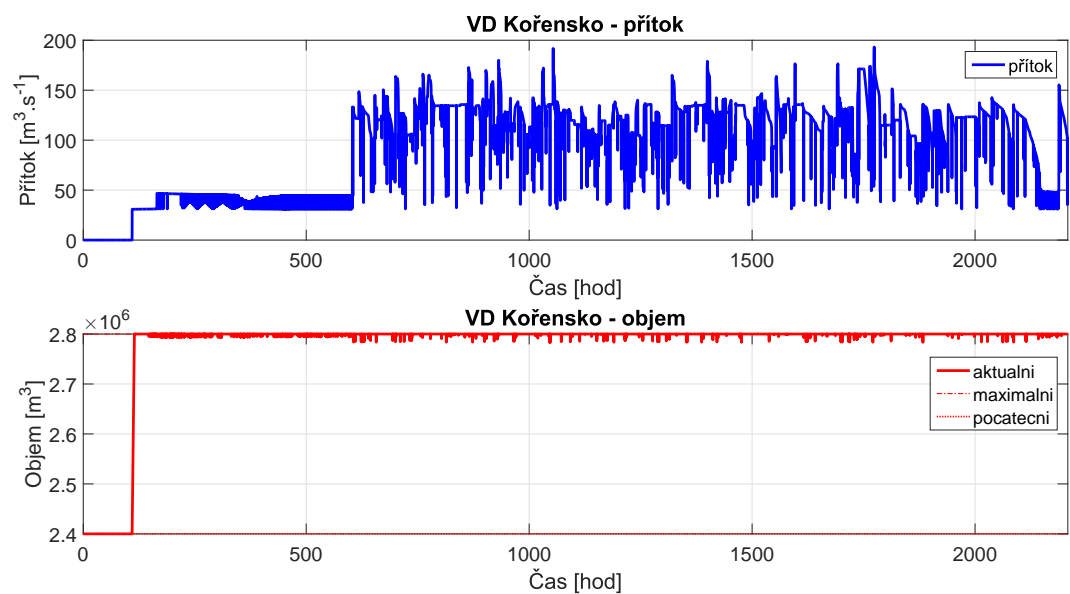
F.2 Referenční hodnota je maximální velikost objemu



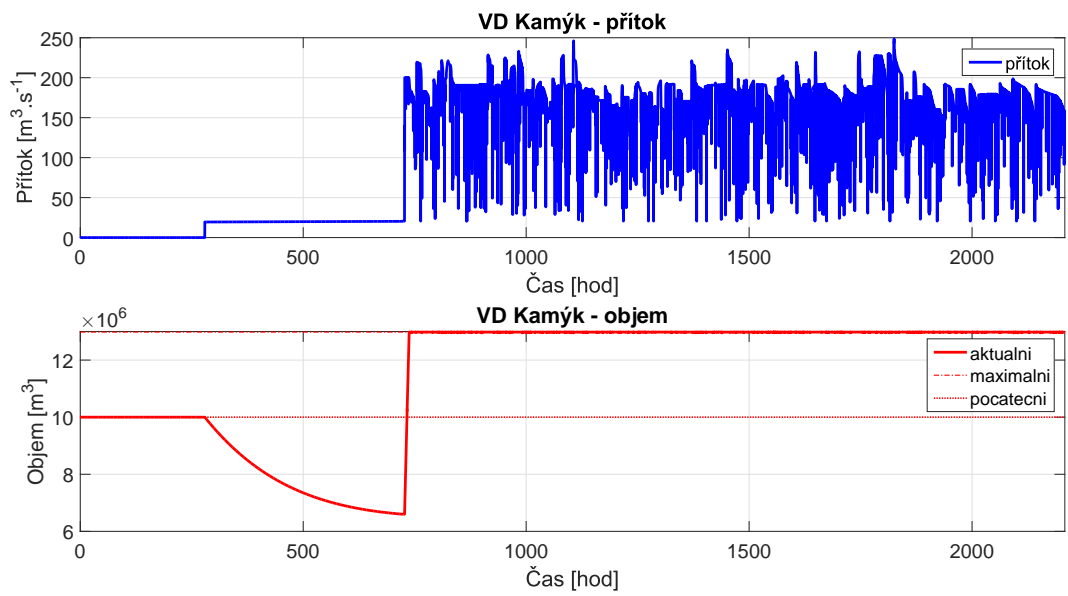
Obrázek F.6: Režim objemové regulace II pro Lipno II



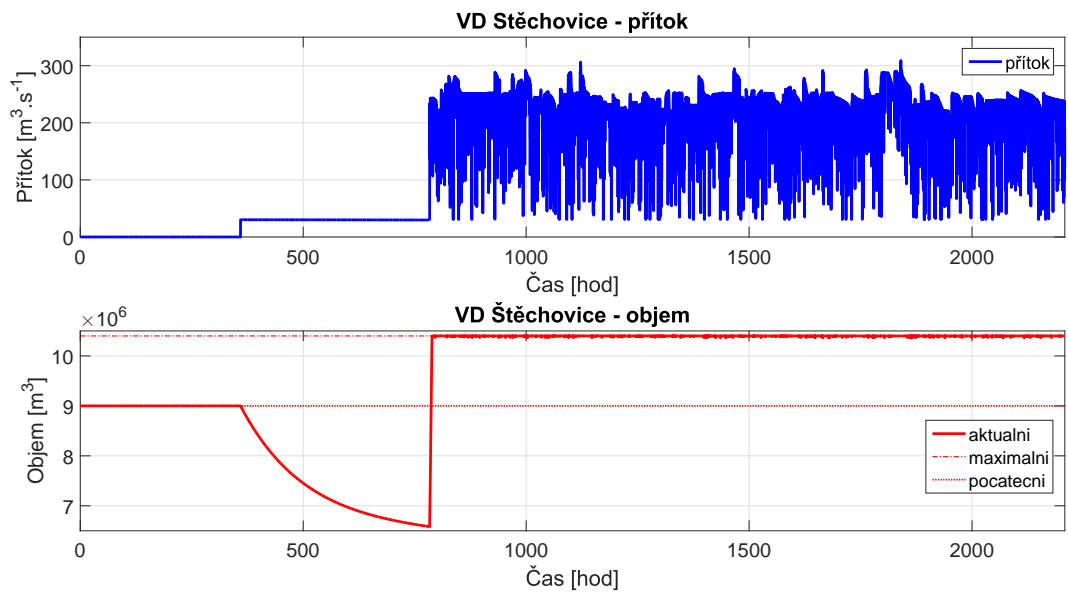
Obrázek F.7: Režim objemové regulace II pro Hněvkovice



Obrázek F.8: Režim objemové regulace II pro Kořensko



Obrázek F.9: Režim objemové regulace II pro Kamýk



Obrázek F.10: Režim objemové regulace II pro Štěchovice

G. Příložené CD

K práci je přibaleno CD se všemi podklady, simulacemi a daty, které byly na tuto práci použity.