

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hydrotechnické řešení jezu Radotín

Hydro-Engineering solution of weir Radotín

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Králík, Ph.D.

Květen 2022

Adam Hromada

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hromada Jméno: Adam Osobní číslo: 486234

Zadávací katedra: K142 - Katedra hydrotechniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Hydrotechnické řešení jezu Radotín

Název bakalářské práce anglicky: Hydro-Engineering solution of weir Radotín

Pokyny pro vypracování:

Na základě zadané dokumentace navrhnete řešení jezu včetně uzávěru na plánovaném jezu Radotín. Porovnejte různé typy uzávěrů, co se týče kapacity, ceny a jejich výhod a nevýhod.

Zpracujte hydraulické výpočty a výkresovou dokumentaci k vybranému návrhu.

Seznam doporučené literatury:

Medřický V., Valenta P.: Hydrotechnické stavby 1, Navrhování jezů, ČVUT, Praha, 2009

Medřický V.: Hydrotechnické stavby 2 / Vodní cesty, ČVUT, Praha, 2018

Gabriel, P., Grandtner, T., Průcha, M., Výbora, P.: Jezy. SNTL, Praha, 1989


Kolář V., Bém J., Patočka C.: Hydraulika, SNTL, Praha, 1983


Boor B., Patočka C., Kunštáský J.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby, SNTL, Praha, 1968

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Martin Králík Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 2.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022
Údaj uveďte v souladu s datem 15.5.2022 lánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce



Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

2.2.2022

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

.....

Adam Hromada

Poděkování

Děkuji Ing. Martinovi Králíkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a cenné rady.

Dále děkuji Ředitelství vodní cest ČR a firmě Sweco Hydroprojekt a.s. - Praha za poskytnuté materiály.

ABSTRAKT

V bakalářské práci je řešen projekt plánovaného jezu Radotín se zaměřením na jezový uzávěr. V práci je provedeno porovnání jednotlivých typů jezových uzávěrů a výběr nejvhodnějšího z nich pro plánovaný jez. Vybraný uzávěr je navržen a posouzen ve statickém programu. Dále je navržena stavební část jezu na odolnost proti ztrátě stability.

KLÍČOVÁ SLOVA

jez, jezový uzávěr, klapka, vývar

ABSTRAKT

This bachelor thesis studies the project of the planned weir Radotín with a focus on the weir gate. The thesis compares various types of weir gates and selects the most suitable one. The selected weir gate is designed and assessed in a computational software. Moreover the construction part of the weir is designed and assessed for loss of stability.

KEY WORDS

weir, weir gate, flap gate, downstream apron

Obsah

1. ÚVOD	8
2. PODKLADY A VSTUPNÍ ÚDAJE	9
2.1 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ	9
2.1.1 Jez Modřany.....	10
2.1.2 Radotínský přístav	11
2.2 PŘEDPROJEKTOVÁ PŘÍPRAVA SPLAVNĚNÍ BEROUNKY V RADOTÍNĚ.....	11
2.3 GEOLOGICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY	12
2.4 HYDROLOGICKÁ DATA.....	13
2.4.1 Vodní režim.....	13
2.4.2 Povodně a záplavové území.....	14
2.5 ZÁMĚRY V OBLASTI	16
2.5.1 Splavnění Berounky.....	16
2.5.2 Radotínská jezera	18
2.6 PLÁNOVANÝ JEZ RADOTÍN	21
2.6.1 Popis jezu	21
2.6.2 Účel.....	22
3. SROVNÁNÍ A VÝBĚR VARIANTY ŘEŠENÍ JEZU	23
3.1 VÝBĚR JEZOVÉHO UZÁVĚRU	23
3.1.1 Přehled jezových uzávěrů.....	23
3.1.2 Kritéria hodnocení.....	26
3.1.3 Určení vah jednotlivých kritérií	27
3.1.4 Varianty jezového uzávěru a jejich obodování	28
3.2 VÝŠKA JAMBOROVA PRAHU A POČET POLÍ	34
3.2.1 Jamborův práh.....	34
3.2.2 Počet a velikost polí	38
4. NÁVRH A POSOUZENÍ KLAPKOVÉHO UZÁVĚRU	40
4.1 ROZMĚRY NAVRŽENÉ DUTÉ KLAPKY	40
4.2 POSOUZENÍ KLAPKOVÉ UZÁVĚRU	41
4.2.1 Hydrostatický tlak.....	42
4.2.2 Hydrodynamický tlak	42
4.2.3 Vyhodnocení	42
4.3 HYDROMOTOR.....	43
4.4 ZAVZDUŠNĚNÍ KLAPKY	43
4.5 TĚSNĚNÍ KLAPKY	44
5. HYDROTECHNICKÉ VÝPOČTY	46
5.1 MĚRNÁ KŘIVKA DOLNÍ VODY.....	46
5.2 NÁVRH NÁVODNÍHO PILÍŘE.....	47

5.3	VÝPOČET KAPACITY JEZOVÝCH UZÁVĚŘŮ.....	48
5.3.1	<i>Klapkový uzávěr.....</i>	48
5.3.2	<i>Segmentový uzávěr.....</i>	50
5.3.3	<i>Stavidlový uzávěr.....</i>	52
5.3.4	<i>Sektorový uzávěr.....</i>	53
5.4	NÁVRH A POSOUZENÍ VÝVARU.....	54
6.	NÁVRH A POSOUZENÍ STAVEBNÍCH ČÁSTÍ.....	58
6.1	POPIS NAVRŽENÉ KONSTRUKCE.....	58
6.1.1	<i>Jezová část.....</i>	58
6.1.2	<i>Vývarová deska.....</i>	59
6.1.3	<i>Pilíře.....</i>	59
6.2	POSOUZENÍ STABILITY SPODNÍ STAVBY.....	59
6.2.1	<i>Síly působící na konstrukci.....</i>	61
6.2.2	<i>Zatěžovací stavy.....</i>	63
6.2.3	<i>Jezové těleso.....</i>	64
6.2.4	<i>Vývarová deska.....</i>	66
7.	ZÁVĚR.....	70
8.	SEZNAM POUŽITÝ ZDROJŮ.....	71
9.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
10.	SEZNAM TABULEK.....	77
11.	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

1. Úvod

Ve své bakalářské práci se zabývám navrženým jezem Radotín, který se plánuje na řece Berounce na jihu Prahy. Účelem jezu Radotín je především zajištění splavnění Berounky v jejím dolním úseku. Jez má být také součástí projektu Radotínských jezer (či Radotínských lagun), což je dlouhou dobu plánovaný projekt na vybudování soustavy jezer v oblasti soutoku Vltavy a Berounky. Tyto jezera mají sloužit jako rekultivace území po plánované těžbě štěrkopísků. Součástí jezer má být také ochranný přístav a velký rekreační areál.

Projekt Radotínských jezer se od původních plánů velmi okleštil a v současnosti jsou preferovány jeho redukované varianty, které již s jezem Radotín nepočítají. Také Berounka je již vyjmuta z využitelných vodní cest, proto realizace splavnění Berounky, a tak i jezu Radotín je v blízké budoucnosti nepravděpodobná.

Nicméně z mého pohledu se jedná o zajímavý vodohospodářský projekt, který si stále zasluhuje naši pozornost. Také samotná lokalita soutoku Vltavy s Beroukou má velký potenciál, jak rekreační, ekonomický, tak i environmentální. Jakékoliv využití tohoto potenciálu bude vyžadovat pečlivý návrh, který tyto všechny aspekty skloubí. Proto není vyloučeno, že v budoucnosti bude projekt jezu Radotín znovu oprášen.

Cílem bakalářské práce je navrhnout vhodné řešení jezu na základě poskytnuté předprojektové přípravy. V práci na úvod krátce představím zájmovou oblast, kde uvedu projekt Radotínských jezer a splavnění Berounky. Dále se budu zabývat jezem Radotín, kde se zaměřuji pouze na samotnou jezovou část. Ostatní součásti jezu, jako je plavební komora a vodní elektrárna, v práci nebudou řešeny.

Provedu porovnání různých typů jezových uzávěrů a vyberu ten nejvhodnější pro zamýšlený jez. Poté uzávěr navrhnu, namodeluji a staticky posoudím ve výpočtovém programu na deformace a napětí. Provedu hydrotechnické výpočty kapacity jezu a vypočítám rozměry vývaru. Na závěr navrhnu spodní stavbu, kterou posoudím na udržení stability. Výsledný návrh bude vykreslen na přiložené výkresové dokumentaci.

2. Podklady a vstupní údaje

2.1 Popis zájmového území

Zájmové území se nachází na jihu hlavního města Prahy v oblasti soutoku řeky Vltavy a Berounky, v široké údolní nivě těchto dvou řek. Plánovaný profil jezu je umístěn nedaleko přístavu Radotín na Berounce.

Území se nachází mezi městskými částmi Radotín a Zbraslav. Pravý břeh, spadající pod městskou část Zbraslav, je převážně zemědělsky využívaný. Nachází se zde také golfové hřiště. V budoucnu je tu opět zvažována těžba štěrkopísku.

Na levém břehu, který náleží do katastrálního území Radotín, již těžba štěrkopísku probíhá. Dále se tu nachází rozsáhlý opuštěný areál se skleníky a skládka suti.

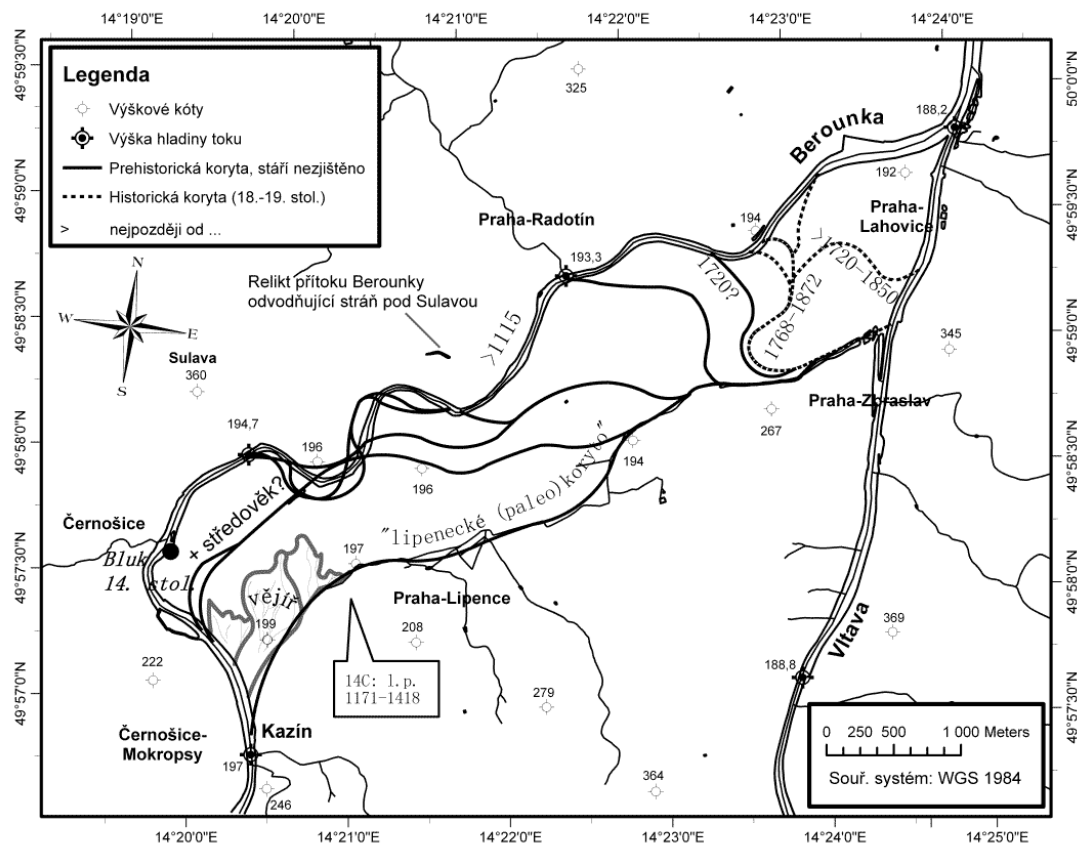


Obrázek 1: Satelitní snímek zájmové oblasti [1]

Řeka Berounka v zájmovém území tvoří širokou říční nivu. Vodní tok se v ní průběhu historie vyvíjel a měnil svůj průběh (Obrázek 2). Po dlouhá staletí se Berounka vlévala

do Vltavy asi 1,5 km jižněji, než tomu je v současnosti. Vlivem povodní se původní koryto Berounky zanášelo a hlavní tok se posouval severněji. Na konci 19. století bylo koryto uměle stabilizováno do současné podoby. V původním korytě Berounky dnes protéká Lipanský potok.

V blízkosti plánovaného jezového profilu se nachází vyústění přepadu kanalizace a šybyka vodovodu 2xDN 1000 mm.



Obrázek 2: Vývoj řečiště Berounky v zájmové oblasti [2]

2.1.1 Jez Modřany

Jez Modřany byl vybudován na Vltavě v letech 1979-1988. Nachází se asi 1,5 km po proudu od soutoku Vltavy s Berouňkou. Jez zajišťuje dostatečnou plavební hloubku na Vltavě v úseku Modřany a Vodní dílo Vrané.

Jez je tvořen 3 poli každé o šířce 27 m hrazené klapkový uzávěrem o výšce 3,3 m. Spád jezu je 2,5 m. [3]

Součástí vodního díla je také malá vodní elektrárna o výkonu 1,62 MW [4], plavební komora a sportovní propust.



Obrázek 3: Jez Modřany [4]

2.1.2 Radotínský přístav

Radotínský přístav je nákladní přístav vybudován po výstavbě Modřanského jezu, v jehož zdrži se nachází. Přístav je situován na levém břehu Berounky ř.km 0,65–1,2. Plocha přístavního bazénu je 1,6 ha a pozemní části 2 ha. Přístavní hrana má 6 poloh pro velká plavidla. Přístav slouží k překládce sypkých materiálů. V současnosti stále roste jeho význam i pro rekreační plavidla. [5]

2.2 Předprojektová příprava Splavnění Berounky v Radotíně

Základní podkladem k návrhu jezu je dokument „Předprojektová příprava Splavnění Berounky v Radotíně“ zpracovaný společností HYDROPROJEKT CZ, a.s v roce 2009 na objednávku Ředitelství vodních cest ČR. Dokument byl poskytnut se souhlasem Ředitelství vodních cest ČR.

Součástí dokumentace byly přílohy:

A2 – technická zpráva (*.pdf)

B.3-b – Situace výsledného řešení (*.pdf, *.dwg)

B.3A – Situace výsledného řešení jez 3x20 m (*.pdf)

B.3 – Situace výsledného řešení – jez 2x30 m (*.pdf)

B.4 – Vzorový podélný řez jezem, M 1:100 (*.pdf, *.dwg)

B.5 – Půdorys a podélný řez plavební komorou (*.pdf, *.dwg)

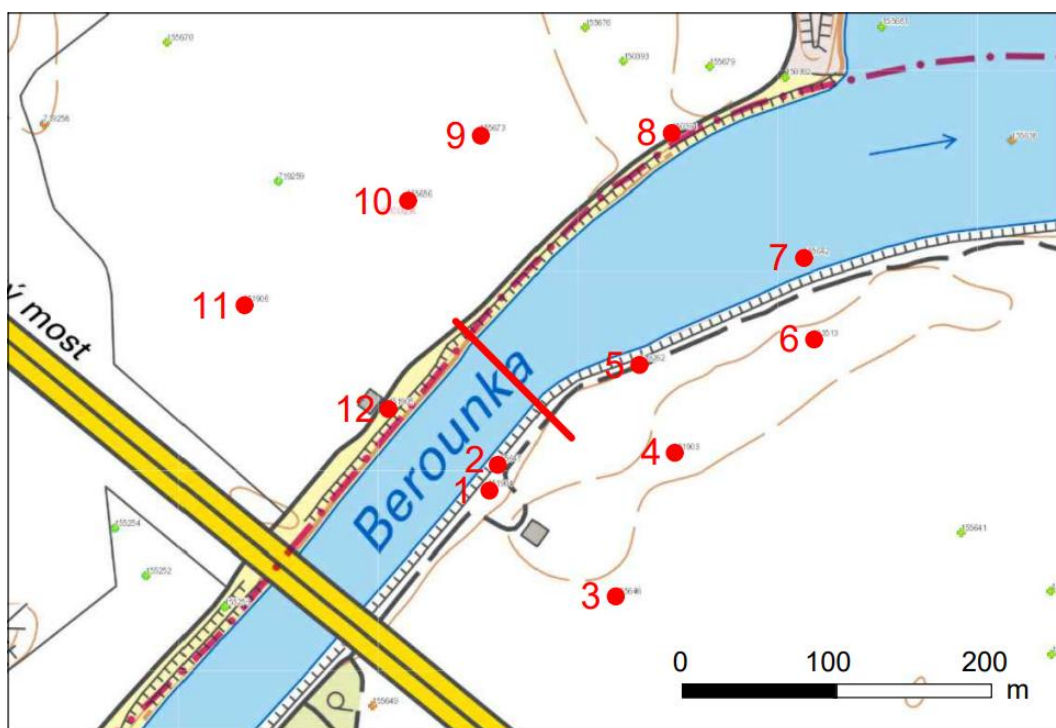
B.6.1 – Příčný řez plavební komorou, M 1:100 (*.pdf)

B.6.2 – Příčný řez plavební komorou, M 1:100 (*.pdf)

B.7 – Vzorové příčné řezy plavební kanálem M 1:200 (*.pdf, *.dwg)

2.3 Geologické a hydrogeologické poměry

Podkladem ke geologickým podmínkám byly výsledky z archivních průzkumů. V blízkém okolí (cca do 200 m) kolem jezového profilu bylo v letech 1967-1991 provedeno 12 vrtů (Obrázek 4, Tabulka 1) o hloubce 5 až 15 m.



Obrázek 4: Vrtná prozkoumanost s vyznačenými vybranými vrtvy [6]

Pokryvný útvar tvoří fluvialní sedimenty o mocnosti asi 9 až 14 m. Sedimenty mají charakter hrubě zrnitých štěrků s proměnlivou příměsí jemnozrných zemin [7][8]. Koeficient hydraulické vodivosti sedimentů se pohybuje od $K_f = 10^{-3}$ až 10^{-6} m/s [9].

Povrch skalního podloží se nachází v hloubce 9,2 – 13 m pod terénem (kóta 178,70 až 183,13). Podloží je tvořeno ordovickými břidlicemi. Koeficient hydraulické vodivosti břidlic se pohybuje v rozmezí $K_f = 10^{-6}$ až 10^{-8} m/s [8].

Tabulka 1: Vybrané vrty v okolí jezového profilu [6]

Číslo	ID GDO	Hloubka vrtu [m]	Mocnost kvartéru [m]	Úroveň podloží [m n.m.]	Hornina podloží
1	151904	14.0	13.0	178.70	Břidlice
2	155647	10.0	9.2	182.45	Břidlice
3	155646	12.0	10.5	183.13	Břidlice
4	151903	5.0	-	-	-
5	719262	10.0	9.5	182.56	Břidlice
6	603513	7.6	-	-	-
7	155642	14.0	11.0	182.20	Porfyrít
8	150394	15.0	10.8	182.40	Břidlice
9	155673	13.5	11.4	181.90	Břidlice
10	155656	10.3	-	-	-
11	151906	5.0	-	-	-
12	151905	15.0	14.2	179.60	Břidlice

2.4 Hydrologická data

N-leté průtoky (Tabulka 2) jsou převzaty ze stanice Praha–Radotín na Berounce, která se nachází 2,2 km proti proudu od plánovaného profilu jezu Radotín. Stanice spadá do kategorie C a je v provozu od ledna 2011. Plocha povodí závěrného profilu stanice je 8 781,52 km², což je 99,2% z celého povodí řeky.

Z technické zprávy zpracované pro rekonstrukci jezu v Černošicích [8] jsou převzaty m-denní průtoky (Tabulka 3). Třída přesnosti III. Profil se nachází 7,14 km proti proudu.

Tabulka 2: N-leté průtoky na stanici Praha-Radotín [10].

N-leté průtoky	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Průtok [m ³ /s]	298	648	833	1329	1577

Tabulka 3: M-denní průtoky pro profil ř. km 8,143 [8]

m-denní průtoky	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Průtok [m ³ /s]	86.2	57.8	43.8	34.9	28.5	23.6	19.7	16.3	13.4	10.7	8.09	5.5	3.81

2.4.1 Vodní režim

Průtok řeky Berounky je rozkolísaný, do jisté míry přirozený. V povodí řeky Berounky se nenachází vodní díla, která by významněji ovlivňovala průtoky na dolním toku. Na

Berounce je vybudováno množství převážně pevných jezů, které brání přirozenému chodu splavenin. Pomalá rychlost proudění ve zdržích také přispívá k pravidelnému zamrzání řeky.

Na dolním úseku řeky mezi Černošicemi a Radotínem se nachází několik přirozeně proudných úseků (Obrázek 5). Vodní režim v závěrečném úseku Berounky je ovlivňován zdrží Modřanského jezu. Zdrž udržuje stálou hladinu na kótě 189,30 m n.m. s tolerancí +20 cm, -0 cm. Tato kóta je udržována až do průtoku kolem 650 m³/s v profilu Modřany [11].



Obrázek 5: Ústí Radotínského potoka do Berounky v Radotíně

2.4.2 Povodně a záplavové území

Rovinná oblast kolem soutoku Vltavy a Berounky je náchylná k rozsáhlým rozlivům již při povodních s menší dobou opakování. Tato skutečnost je zachycena na snímku níže (Obrázek 6), který zachycuje povodeň z roku 2013. Při této povodni průtok na Vltavě na limnigrafické stanici v Malé Chuchli ukazoval průtok na úrovni přibližně Q₂₀.

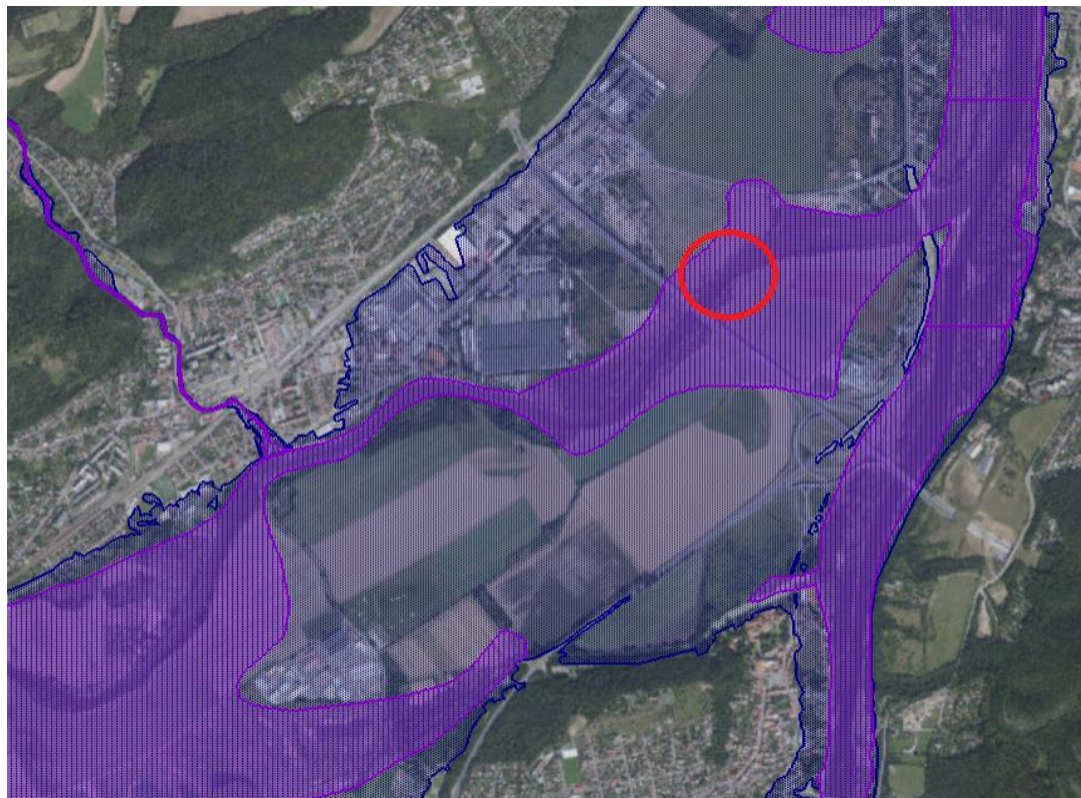
Zvláště problematický může být souběh povodní na Berounce a Vltavě (respektive Sázavě). Souběhu povodní lze do jisté míry vyvarovat vhodnou regulací Vltavské kaskády. Problémem však může být řeka Sázava, která se vlévá do Vltavy asi 15 km proti proudu od soutoku Vltavy a Berounky. Sázava, podobně jako Berounka, není regulovaná. Poslední stupeň Vltavské kaskády – vodní dílo Vrané, které se nachází za soutokem se Sázavou, nedisponuje potřebným retenčním objemem k ovlivnění povodňových vod přicházející ze Sázavy.

Povodně na tomto rovinatém území vyvolávají několikametrové vzestupy hladin. V tabulce níže (Tabulka 4) jsou uvedeny úrovně hladin Berounky v místech

uvažovaného jezového profilu. Vzestup hladiny nad normální stavem je při Q_5 3,6 m, při Q_{100} 6,2 m a při povodni v roce 2002 to bylo 7,6 m.



Obrázek 6: Oblast soutoku Vltavy a Berounky za povodně v roce 2013 [12]



Obrázek 7: Mapa aktivní zóny (fialově) a záplavového území Q_{100} (modře) v zájmové oblasti [13]

Tabulka 4: Úrovně hladiny při N-letých průtocích v profilu jezu [14]

N-leté průtoky	Q ₅	Q ₂₀	Q ₁₀₀	Q ₂₀₀₂
Hladina [m n.m.]	192.92	194.21	195.45	196.91

Za pozornost také stojí ledové bariéry, které pravidelně vznikají na Berounce např. v okolí města Černošice a způsobují lokální povodně.

Na mapě záplavového území (Obrázek 7) je modře vyznačeno záplavové území Q₁₀₀, fialově aktivní zóny a červeně je vyznačeno plánované umístění jezu Radotín. Na mapě jsou zřejmé aktivní zóny v místech původního koryta řeky Berounky (dnes Lipanský potok).

2.5 Záměry v oblasti

V následujících kapitolách jsou popsány záměry, které bezprostředně souvisí s plánovaným jezem Radotín. Jedná se o splavnění Berounky a projekt Radotínských jezer.

2.5.1 Splavnění Berounky

Úvahy o splavnění Berounky již probíhají bezmála 100 let. V kapitole je popsána jejich historie, konkrétní novodobé plány a současný stav.

2.5.1.1 Historie

Záměry o splavnění Berounky do Plzně se začaly objevovat už na začátku 20. století. Např. profesor Antonín Smrček vypracoval projekt vodní cesty Praha – Plzeň – Regensburg [15]. Projekt spočíval ve splavnění Berounky z Prahy do Plzně, následně by vodní cesta pokračovala údolím řeky Radbuzy a Záhořanského potoka. Dále by překonala Všerubské sedlo a dostala se do povodí Dunaje, kde by vedla údolím řeky Chamb a Regen až do Regensburgu. Tím by vznikla vodní cesta spojující povodí Labe a Dunaje.

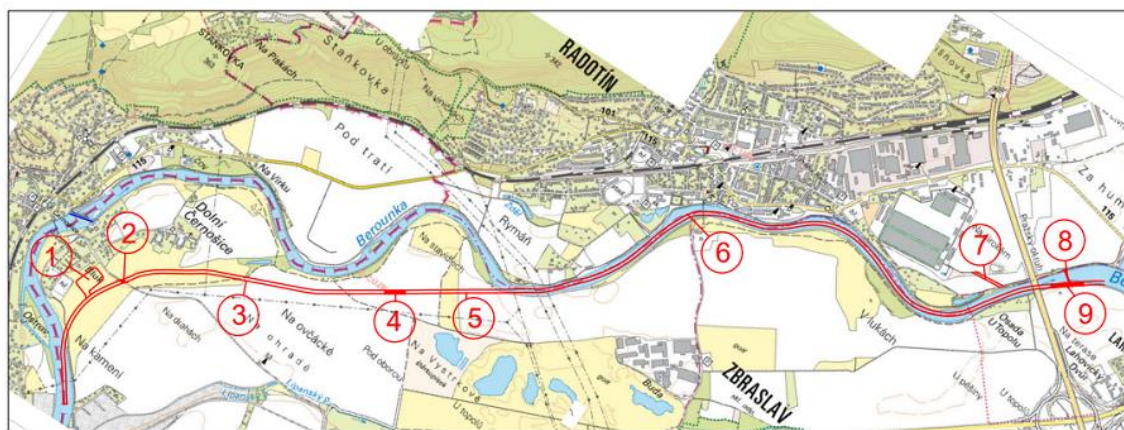
Další úvahy o splavnění Berounky se objevily v 70. letech 20. století kvůli záměru vybudování přehrady Křivoklát. V té době se také uvažovalo o velkovýrobě jaderných reaktorů ve Škodových závodech v Plzni a vodní cesta by ulehčila jejich export [16]. Úsek Berounky od ústí do Roztok měl být řešen soustavou klapkových jezů, mezi kterými měl být i jez Radotín. Dále by vodní cesta pokračovala zamýšlenou nádrží Křivoklát.

2.5.1.2 Novodobé záměry o rekreační splavnění

Novodobé plány o splavnění Berounky vznikly v souvislosti s projektem tzv. Radotínských lagun (viz 2.5.2). V roce 2009 byla dokončena předprojektová dokumentace zabývající se splavněním Berounky do Radotína (viz 2.2).

V roce 2012 byl dokončen generel splavnění řeky Berounky z Prahy do Berouna pro I. třídu [17]. V generelu se počítalo se stavbou dvou nových jezů Radotín a Srbsko. Dále bylo plánováno využití stávajících 7 jezů. V zájmové oblasti této bakalářské práce mělo být splavnění vyřešeno pomocí zmíněného jezu Radotín a plavebního kanálu, který by spojoval zdrže jezů Radotín a Černošice (Obrázek 8).

V roce 2018 si Karlštejnský splavnovací spolek, z.s. objednal studii splavnění řeky Berounky z Prahy do Karlštejna pro třídu 0 [18] (maximální délka plavidla 14 m, ponor 1,2 m). Studie počítala pouze s využitím stávajících jezů. Splavnění mezi Radotínem a Černošicemi mělo být vyřešeno rovněž plavebním kanálem.



- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| ① PŘÍSTAV LIPENCE KM 6.910 | ⑥ OBRATIŠTĚ RADOTÍN KM 3.480 |
| ② MOST SILNIČNÍ KM 6.710 | ⑦ VJEZD DO LAGUN KM 1.430 |
| ③ HORNÍ PLAVEBNÍ KANÁL LIPENCE | ⑧ JEZ RADOTÍN KM 1.050 |
| ④ PK LIPENCE KM 5.150 | ⑨ PK RADOTÍN KM 1.050 |
| ⑤ DOLNÍ PLAVEBNÍ KANÁL LIPENCE | |

Obrázek 8: Záměr splavnění Berounky v zájmové oblasti podle generelu z roku 2012 [17][19][20]

2.5.1.3 Současný stav

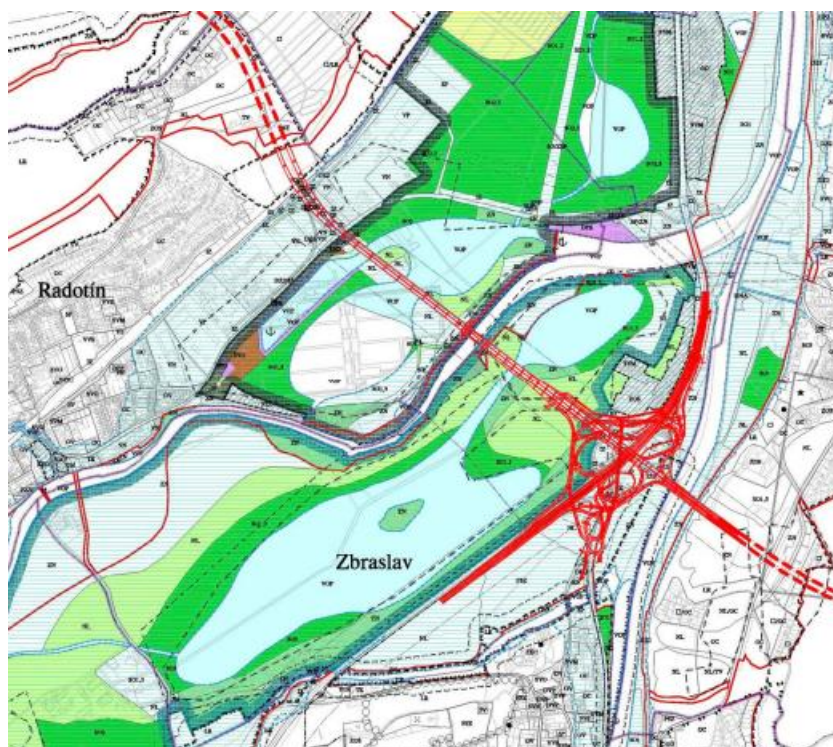
Řeka Berounka je dnes splavná v krátkém úseku od ústí k Radotínskému přístavu (ř. km 0,0–1,2). Splavnění bylo umožněno díky vybudování Modřanského jezu na Vltavě v 80. letech 20. století, jehož zdrž sahá i na spodní úsek Berounky. Úsek je splavný pro plavidla třídy IV.

Záměry vybudovat vodní cestu na Berounce se setkaly s nevolí obyvatel dotčených obcí. Odpůrci argumentovali ochranou krajiny, zhoršením povodňových rizik anebo také tím, že na základě toho, že byla řeka Berounka zařazena jako využitelná vodní cesta (od ř.km 37,0 po přístav Radotín) v zákoně 135/2019 Sb., bylo nutné budovat mosty s dostatečnou podjezdnou výškou, což prodražovalo výstavbu [21]. V roce 2019 byl tento úsek řeky ze zákona vyrazen. V současné době tedy není splavnění Berounky legislativně podpořeno.

2.5.2 Radotínská jezera

Projekt Radotínských jezer (někdy též Radotínské laguny) spočívá v rekultivaci území po těžbě štěrkopísku v oblasti soutoku Berounky a Vltavy. Jámy vytvořené těžbou by byly následně zatopeny a vznikly by jezera, které by sloužily k rekreaci nebo jako ochranný přístav pro lodě.

Na výřezu z územního plánu (Obrázek 9) z roku 2006 je vykreslen plánovaný rozsah jezer. Vzniklo několik studií, které byly převážně zaměřeny na oblast kolem Radotína, kde mělo vzniknout ochranné přístaviště a rekreační areál.



Obrázek 9: Územní plán hl. m. Prahy se zakreslenými jezery 2006 [22]

Ověřovací studie z roku 2009 [23] (Obrázek 10) popisuje výstavbu dvou jezer na pravém břehu řeky Berounky. Jezera byla označována jako jezero 3A a jezero 3B.

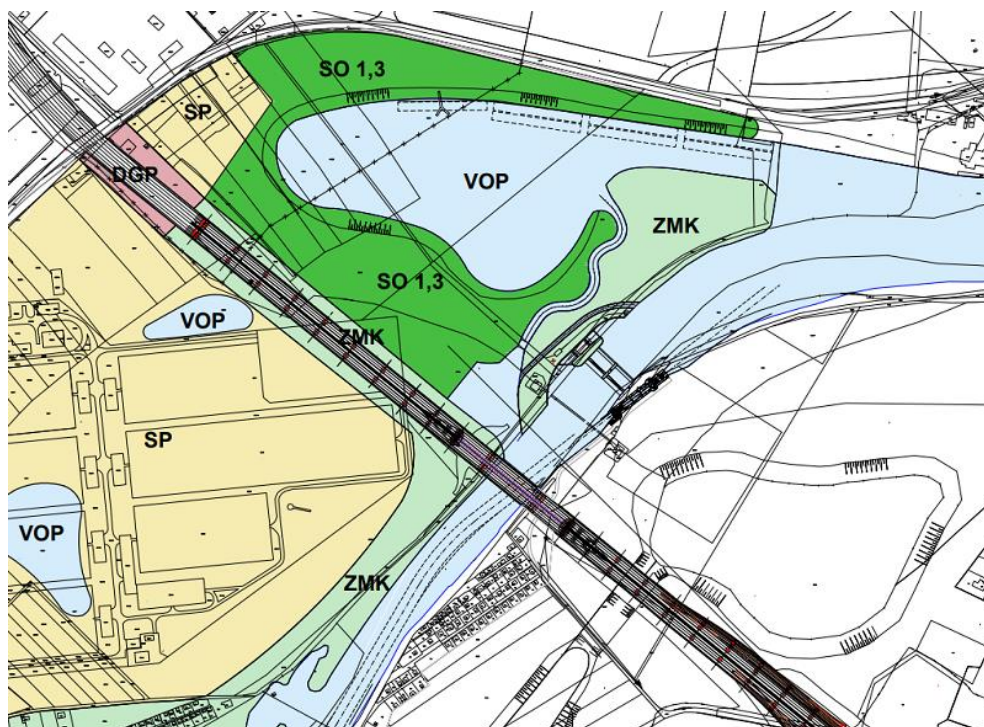
Jižněji umístěné jezero 3A mělo mít rozlohu 16,6 ha a jeho hladina byla v úrovni vzdutí zdrže Radotín. Se zdrží Radotín by jezero bylo propojeno průpichem. V severní části jezera by byl vybudován protipovodňový val, který by chránil 4,6 ha přístaviště pro rekreační a sportovní lodě. Samotné jezero mělo sloužit ke koupání a k bezmotorovým vodním sportům. Jezero mělo také být vybaveno plovoucí restaurací.

Severněji umístěné jezero 3B mělo mít rozlohu 10,63 ha a hladina by byla na úrovni zdrže Modřany. Jezero by bylo spojeno krátkým kanálem s přístavem Radotín. Ze zdrže Radotín měla do jezera vést slalomová dráha, která by byla zakončena umělou surfovou vlnou. V jezeru bylo naplánováno 7 ochranných stání pro velká plavidla. Dalším využitím jezera měly být motorové vodní sporty.



Obrázek 10: Ověřovací studie Radotínská jezera 2009 [23]

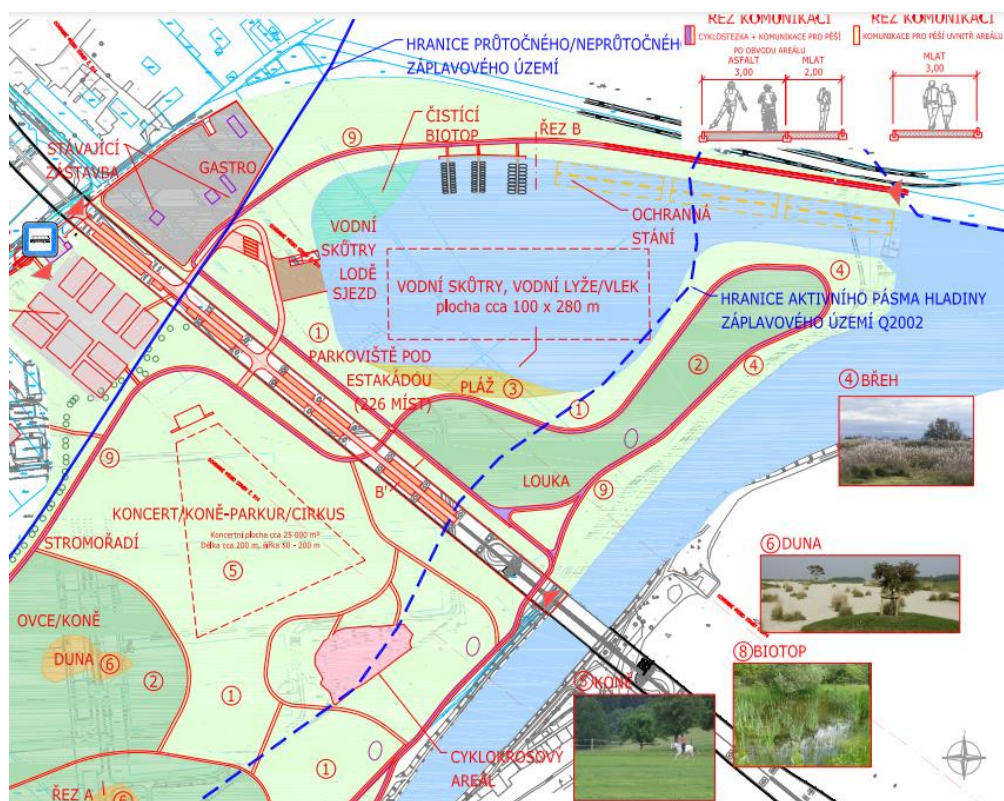
V pozdější alternativní studii z roku 2012 [24] (Obrázek 11) bylo jezero 3A vypuštěno z projektu. Podoba a využití jezera 3B byla zachována. Jez Radotín zde měl být vybudován kvůli plánovanému splavnění Berounky.



Obrázek 11: Alternativní studie Radotínských jezer 2012 [24]

V nejnovější uveřejněné studii, která se zabývá návrhem sportovně rekreačního areálu Radotín (rok 2015) [25] (Obrázek 12) je také počítáno jen s jezerem 3B. Jeho tvar je nepatrně upraven. Jez Radotín v návrhu není uveden. Využití jezera je podobné jako v předchozích studiích. V jezeru je počítáno s 6 ochrannými stánými pro velká plavidla a dalšími stánými pro menší plavidla. V jezeru byla navržena plocha pro vodní sporty a vymezena plocha pro pláž. V severní části je navrhnut čistící biotop.

V současnosti by měl být dokončován plán příměstského parku Soutok [26]. Projekt má řešit komplexní využití říční nivy na soutoku Berounky a Vltavy a propojit všechny dílčí záměry. Tento projekt je zpracován od roku 2015 a má být dokončen v roce 2022.



Obrázek 12: Komplexní urbanisticky krajinný návrh – Sportovně rekreačního areálu Radotín 2015 [25]

2.6 Plánovaný jez Radotín

Plánovaný jez Radotín je umístěn na ř.km 1,02 řeky Berounky. Řeka je zde již ovlivněna vzdušným zdrže jezu Modřany.



Obrázek 13: Předpokládaný profil jezu Radotín (pohled po vodě)

2.6.1 Popis jezu

V následující kapitole je popsán návrh jezu Radotín, tak jak je uveden v předprojektové přípravě [14].

2.6.1.1 Úroveň hladiny

V předprojektové přípravě jsou navrženy dvě varianty nivelety hladiny zdrže a to 191,50 m n.m. a snížená 191,30 m n.m. Snížená hladina povede sice ke zvýšení potřeby prohrábek na konci zdrže, ale tyto náklady by měly být převýšeny úsporami na úpravy břehů a opatření ohledně kanalizace [14]. Spád jezu je navržen na 2,2 m (2,0 m při snížené hladině). Výběr kóty hladiny měl být určen také v závislosti na úrovni hladiny jednoho ze projektovaných jezer (označováno jako jezero 3A). V bakalářské práci bude uvažována varianta s kótou hladiny 191,50 m n.m.

2.6.1.2 Jezový stupeň

Jezový stupeň je navržen ve dvou variantách – dvě pole po 30 m a tři pole po 20 m. Jez tvoří pevná část, která je řešena Jamborovým prahem o výšce 1,2 m a pohyblivá část hrazená dutou klapkou. Hrazená výška klapky je 3,3 m a ovládání je řešeno podpíranými hydromotory. Tolerance hladiny jezu Radotín je navržena +30 cm/-0. Spodní stavbou jezu je vedena revizní chodba.

2.6.1.3 Plavební komora

Plavební komora je v předprojektové přípravě umístěna na pravém břehu. Šířka plavební komory je 7,0 m, délka 45,0 m a hloubka nad záporníkem jsou 3,0 m. Dolní vrata plavební komory jsou vzpěrná se stavítky pro přímé prázdnění. Horní vrata jsou klapkové. Plnění plavební komory je s jednostranným obtokem.

2.6.1.4 MVE

V předprojektové přípravě je pouze vymezen prostor pro malou vodní elektrárnu, jinak MVE není v dokumentaci řešena. Prostor pro MVE je uvažován na levém břehu.

2.6.1.5 Sportovní a rybí přechod

Sportovní propust společně s rybím přechodem je navržena na levém břehu. Tvoří ho přívodní kanál, který se asi po 135 m rozděluje na dvě části – rybí přechod a sportovní propust. Rybí přechod je navržen jako přírodě blízký a je široký 5-10 m. Sportovní propust je široká 2,5 m a je vybavena kartáči.

2.6.2 Účel

Účelem jezu je zajištění dostatečné plavební hloubky (1,6 m) od zdrže Modřany až k lávce přes Berouнку v Radotíně. Za předpokladu realizace Radotínských jezer je dalším účelem jezu držet vzduť pro jedno z jezer (označováno jako jezero 3A), které by sloužilo jako ochranný přístav.

Dalším účelem je využití hydroenergetického potenciálu řeky.

3. Srovnání a výběr varianty řešení jezu

V následující kapitole bude proveden výběr varianty jezu, která bude dále rozvíjena.

Výběr nejvhodnější varianty je rozdělen do dvou částí. V první části je řešen výběr jezového uzávěru. V druhé části je proveden výběr počtu jezových polí a volby výšky Jamborova prahu.

3.1 Výběr jezového uzávěru

3.1.1 Přehled jezových uzávěrů

V této kapitole jsou představeny nejpoužívanější typy jezových uzávěrů. Jako zdroj pro tyto kapitoly posloužily publikace *Jezy* [27] a *Hydrotechnické stavby I* [28].

3.1.1.1 Stavidlový uzávěr

Hlavní nosný systém stavidlového uzávěru v nejjednodušší formě tvoří dva hlavní nosníky profilu I. U modernějších variant stavidla se používají příhradové trojbloky nebo uzavřené tenkostěnné průřezy. Vedlejší nosný systém podpírá svislý hradící plech. Stavidlo se pohybuje na kolovém podvozku. Kolový podvozek se posouvá po kolejnicích umístěných v drážce v pilíři. Hloubka drážek bývá 1 až 1,5 m.

Šířka pilíře u stavidlových jezů se pohybuje mezi 4-5 m. Pohyb zajišťují Gallovy řetězy. Maximální světlost pole stavidlového jezu dosahuje asi 20 m, při použití příhradového bloku až 25–30 m.

Existuje několik variant stavidlového uzávěru. Nejjednodušší rozdělení je na stavidla zdvižná a spustná. Zdvižné stavidlo převádí průtok pod stavidlem, naopak spustné stavidlo převádí vodu přepadem. Obojí má své výhody a nevýhody, proto vznikly varianty stavidla s nasazenou klapkou a dvoudílná stavidla, které kombinují oba hydraulické jevy.

Stavidlo s nasazenou klapkou je modifikace zdvižného stavidla, kdy je na vrcholu stavidla umístěna klapka. Dnes nejčastěji dutá klapka. Tento uzávěr umožňuje převádět vodu pod stavidlem a zároveň přepadem přes klapku. Tato modifikace je vhodná pro hrazené výšky 3,5 až 8 m. Obdobně je na tom dvoudílné stavidlo, které tvoří dvě samostatná stavidla. Tento typ se navrhuje na vyšší hrazené výšky a to 8 až 15 m.

3.1.1.2 Segmentový uzávěr

Nosnými prvky segmentového uzávěru jsou buď hlavní podélníky anebo uzavřený skříňový průřez. Konstrukce segmentu je zpevněna podélníky a příčnickami, které podpírají válcovou hradící stěnu. Celá konstrukce je připojena na ramena, která s konstrukcí otáčejí kolem otočného čepu umístěného na pilíři a přenáší zatížení od vody do pilířů. Ramena

jsou nejčastěji tlačena, ale mohou být i tažena. Ramena mohou být rovinná anebo šikmá. Šikmá ramena výhodně snižují momenty působící v hlavních nosnících.

Obdobně jako u stavidlového uzávěru existují segmenty zdvižné, spustné, s nasazenou klapkou a dvoudílné. Princip a motivace těchto variant je totožná jako u variant stavidla. Segmenty jsou vhodné pro hrazené výšky od 3 m a světlost jezových polích se pohybuje v rozmezí 15 až 20 m.

Obvyklá šířka pilířů segmentového jezu jsou 4 m. Pohyb segmentu zajišťují Gallovy řetězy, či hydromotory. Díky ramenům jsou zdvihové síly menší než u stavidlových jezů. Segmenty s dostatečnou tuhostí mohou být ovládány jednostranně.

3.1.1.3 Válcový uzávěr

Válcový uzávěr se používal převážně na začátku 20. století, dnes se již nenavrhuje. Válcový uzávěr je tvořen vyztuženou troubou s připevněným štítem. Obdobně jako u předešlých uzávěrů byly navrženy válcové uzávěry zdvižné, spustné a s nasazenou klapkou. Válcové uzávěry se používaly pro pole se světlostí 20 až 30 m a hrazenou výškou obvykle 2 až 5 m.

Válcový uzávěr se pohybuje valivým pohybem po ozubené drážce, která je umístěna ve sklonu 70 až 80° na pilíři. Drážky jsou oproti stavidlu hlubší a to 1,5 – 2 m. Uzávěr má velkou tuhost na kroucení, proto bývá ovládán jednostranně. Pohyb je zajištěn lanem, či řetězem, které jsou ovinuty kolem uzávěru.

3.1.1.4 Hydrostatický uzávěr

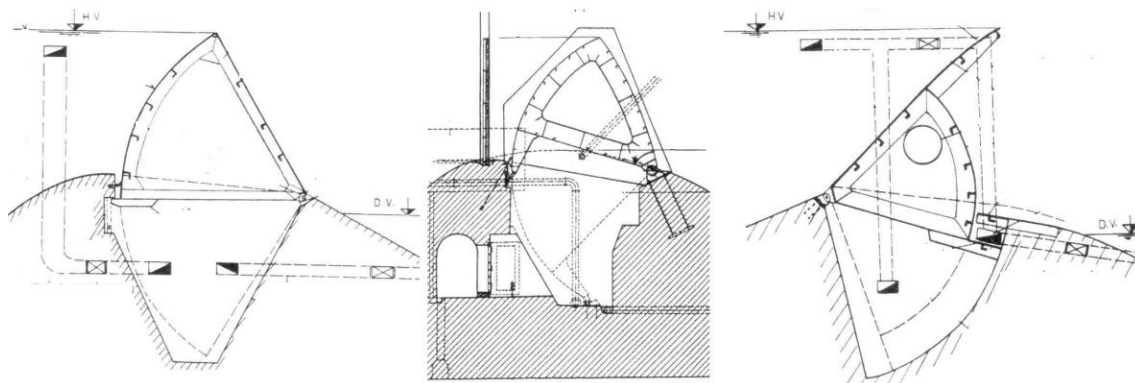
Principem hydrostatických uzávěrů je jejich ovládání pomocí přetlaku vody v tlačné komoře. Změna velikosti přetlaku uzávěr sklápí nebo zvedá. Hydrostatické uzávěry rovnoměrně přenášejí zatížení do spodní stavby, proto jsou vhodné pro jezové pole s velkou světlostí. Existuje mnoho různých konstrukcí hydrostatických uzávěrů. Nejpoužívanějšími typy jsou sektor a segment (Obrázek 14).

Sektorový uzávěr je nejrozšířenější ze všech hydrostatických uzávěrů. Sektor má trojúhelníkový tvar. Stěny sektoru tvoří krycí stěna na návodní straně a hradící stěna na vzdušné straně. Spodní stěna sektoru není souvisle vyplněna, tak aby byl sektor naplněn tlakovou vodou. Celý sektor je upevněn na návodní straně ke spodní stavbě. Uzávěr se sklápí do spodní stavby a voda je převáděna přepadem.

Hydrostatický segmentový uzávěr se rozlišuje na dva typy dle polohy ložisek, a to na segmentový uzávěr s ložisky na vzdušné straně a na segmentový uzávěr s ložisky na návodní straně.

Segmentový uzávěr s ložisky na vzdušné straně je podobné konstrukce jako sektor s tím rozdílem, že spodní stěna je zahrazena. Vnitřek segmentu je vyplněn vzduchem. Lze ho použít jen v případech, že dolní voda je pod úrovní uzávěru, proto se používá především na přehradách.

Segmentový uzávěr s ložisky na návodní straně má taktéž tvar trojúhelníku, ale krycí stěna přechází do konzole. Uzávěr je opatřen hybným ramenem. Vnitřek segmentu je naplněn vodou a nachází se v něm plovák, který vyvažuje konstrukci. Uzávěr lze použít i při vyšší úrovni dolní vody.



Obrázek 14: Konstrukce hydrostatických uzávěrů. Zleva: sektor, segment s ložisky na vzdušné straně a segment s ložisky na návodní straně [28]

3.1.1.5 Klapkový uzávěr

Klapkový uzávěr je nejpoužívanějším typem pokloповých uzávěrů. Klapkové uzávěry se otáčejí kolem osy umístěné na spodní stavbě. Rozlišují se 3 typy klapky: desková, troubová a dutá. Nejhojněji používané a vývojem nejmodernější jsou duté klapky. Nosný prvek duté klapky je tvořen dvěma válcovými plochami. Na vzdušné straně je výztužný plech a na návodní straně je hradící plech. Plechy jsou svařeny k sobě a tvoří čoučkovitý tvar. Vnitřní konstrukce je vyztužena diafragmami, kterými je i připojena celá konstrukce k ložiskům na spodní stavbě. Ve výztužném plechu jsou otvory, kterými do konstrukce vniká voda. To zajišťuje bezproblémové sklopení klapky pod úroveň dolní vody.

Dutá klapka je vhodná pro hrazené výšky 2 až 5 m a pro pole se světloú šířkou 15 až 20 m. Jedno jezové pole může být osazeno dvěma klapkami, takže světloú šířka hrazeného pole může být až 30-40 m.

Pohyb duté klapky je zajištěn nejčastěji hydromotory, na kterých je klapka zavěšena anebo je jimi podpírána. Dutá klapka má velkou tuhost na kroucení, proto může být jednostranně ovládaná.

3.1.1.6 Vakový uzávěr

Princip vakového uzávěru spočívá ve vaku, který je naplněn vodou s mírným přetlakem. Vak je vyroben z nylonové tkaniny nebo z pryže. Ovládní uzávěru je zajištěno změnou tlaku vody ve vaku. Při povodňových stavech se vak automaticky sklápí. Jedná se o jednoduchý a levný uzávěr, který nevyžaduje složitou spodní stavbu. Hodí se na pole s velkou světlostí. Problémem vakového uzávěru je jeho nízká životnost a mechanická zranitelnost.

3.1.2 Kritéria hodnocení

Pro vzájemné porovnání jezových uzávěrů byla zvolena metoda vícekritériálního hodnocení. Rozhodování proběhlo na základě 14 kritérií, kterým byla přidělena různá váha dle jejich významnosti. Nejprve budou představena jednotlivá kritéria.

1) Spolehlivost funkce při vyšších vodních stavech

Kritérium zahrnuje schopnost spolehlivě ovládat uzávěr i při vysokých vodních stavech. V uvažovaném jezovém profilu lze očekávat časté a vysoké vzestupy hladiny.

2) Jemná regulace hladiny

Účelem jezu je zajistit dostatečnou plavební hloubku v zájmovém úseku. Nepřesnosti v regulaci hladiny mohou zvláště na konci zdrže způsobit problém v plavbě. Tolerance provozních hladiny zdrže Radotínského jezu byla dle předprojektové přípravy [14] navržena na +30 cm/ -0.

3) Spotřeba betonu

Spotřeba betonu je jednou z nejdůležitějších položek ceny vodních staveb. Z ekonomického, ale i z ekologického hlediska je vhodné snižovat spotřebu betonu. Výroba betonu je energeticky náročná a produkuje množství skleníkových plynů.

4) Spotřeba oceli

Ocel je v porovnání s betonem velmi drahý materiál. Oproti betonu je ocel ekologičtější a lze jí recyklovat. Ocelové části stavby jsou vystaveny nepříznivým vnějším účinkům, proto je nutné je pravidelně natírat ochrannými nátěry, popřípadě vyměňovat. Proto snížení ocelových prvků povede i ke snížení provozních nákladů.

5) Zemní práce

Očekávaná cena výkopu stavební jámy jezu bude 64 Kč/m³ [30]. Třída těžitelnosti je 1 a 2. Výkopek je nutné přesunout a uskladnit, což stojí množství zdrojů. V případě projektu jezu se předpokládá využití výkopku k úpravám břehů zdrže a k jiným terénní úpravám. Pokud bude výstavba jezu probíhat současně s rozsáhlou těžbou štěrkopísku, lze očekávat, že v okolí jezu bude vybudována infrastruktura k uskladnění a využití výkopku.

6) Typizace

Používat typizované uzávěry je vhodné z několika důvodů. Jednak existuje větší množství firem, které uzávěr dokáží vyrobit a budou se ucházet o zakázku, proto lze očekávat jejich nižší cenu. Typizace také spoří provozní náklady (náhradní díly, know-how). Výhodné je také používat technologii, se kterou má provozovatel zkušenosti.

7) Průchod ledů

V jezové profilu lze očekávat ledochody. Jezový uzávěr by tomu měl být přizpůsoben. Ledy by se neměly akumulovat ve zdrži nebo poškodit samotný uzávěr.

8) Průchod splavenin

V budoucím jezovém profilu lze očekávat průchod šterkových splavenin, které jsou nesený řekou Berouňkou, tak také Radotínským potokem, který ústí na konci plánované zdrže.

9) Výška konstrukce

Výška konstrukce ovlivňuje začlenění do krajiny. Čím vyšší konstrukce je, tím je složitější konstrukci vhodně začlenit do krajiny. S výškou konstrukce také roste nárok na spotřebu materiálu, a to nejen na vlastní konstrukci, ale také na ovládací prvky (Gallovy řetězy, pístnice, pojezdy). Vysoké konstrukce také vytvářejí překážky při povodňových stavech na rozdíl od nízkých zátopných konstrukcích.

10) Vliv na životní prostředí

Vliv na životní prostředí je zásadní kritérium, které může rozhodnout o realizaci, nebo nerealizaci celého záměru. Do kritéria je také zahrnuto začlenění do krajiny. Dle dokumentace Radotínského jezu (viz kapitola 2.5) na využití území k rekreaci je důležité, aby stavba působila esteticky s příznivým ohledem na životní prostředí.

11) Rovnoměrné roznášení sil na spodní stavbu

Požadavek na rovnoměrné roznášení sil na spodní stavbu je důležitý u méně únosného a jinak problematického podloží kvůli zachování stability díla.

12) Životnost a údržba

Údržba jezového uzávěru je fixní dlouhodobí náklad, který je výhodné snížit již při návrhu. Provozní náklady stavby mohou hrát významnou roli při rozhodování o ekonomičnosti projektu splavnění Berouňky. Snadná údržba také může snížit riziko havárií.

13) Jednoduchost těsnění

U uzávěrů vyžadující složitější těsnění je předpoklad jeho poruch a vyšších nákladů při jejich opravách a výměnách.

14) Kapacita

Vodní dílo nesmí zhoršovat průchod povodní. Plánovaný jez Radotín se nachází v široké údolní nivě, ve které jsou běžné široké rozlivy (viz kapitola 2.4.2). Velká část průtoku bude převáděna mimo jezová pole inundací.

3.1.3 Určení vah jednotlivých kritérií

Váhy kritériím byly určeny dle metody párového srovnávání (někdy též Fullerova metoda).

Tato metoda spočívá v porovnání vždy dvou kritérií mezi sebou. Kritérium, které je vyhodnoceno jako významnější získá preferenční bod. Takto jsou navzájem porovnány všechna kritéria. Na závěr jsou sečteny počty preferencí a přes vztah 3.1 vypočtena jejich váha.

Výpočet váhy kritéria:

$$v_i = \frac{p_i}{n - (n - 1)/2} \quad (3.1)$$

Kde: p_i – počet preferencí kritéria

n – počet kritérií

Sestavený Fullerův trojúhelník je uveden v tabulce (Tabulka 5). Jako kritéria s nejvyšší vahou byla vyhodnocena: „jemná regulace hladiny“ a „životnost a údržba“.

Tabulka 5: Fullerův trojúhelník pro určení vah jednotlivých kritérií

Č.	Kritérium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Počet preferencí [p _i]	Váha [v _i]	Pořadí
1	Spolehlivá funkce při povodni	X	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.03	8
2	Jemná regulace hladiny		X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	0.14	1
3	Spotřeba betonu			X	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0.02	9
4	Spotřeba oceli				X	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	6	0.07	7
5	Zemní práce					X	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0.01	10
6	Typizace						X	0	1	0	0	0	0	1	1	6	0.07	6
7	Průchod ledů							X	1	0	1	1	0	1	1	10	0.11	3
8	Průchod splavenin								X	0	0	0	0	1	0	5	0.05	7
9	Výška konstrukce									X	1	0	0	1	1	9	0.10	4
10	Vliv na životní prostředí										X	1	1	1	1	10	0.11	3
11	Rovnoměrné roznášení sil na spodní stavbu											X	0	1	0	8	0.09	5
12	Životnost a údržba												X	1	1	11	0.12	2
13	Jednoduché těsnění													X	0	2	0.02	9
14	Kapacita														X	5	0.05	7
Celkem																	1.00	

3.1.4 Varianty jezového uzávěru a jejich obodování

Ve vlastním výběru bylo uvažováno 6 variant jezového uzávěru a to:

- A) podpíraná dutá klapka
- B) zdvižné stavidlo
- C) zdvižné stavidlo s nasazenou klapkou
- D) zdvižný segment
- E) zdvižný segment s nasazenou klapkou
- F) hydrostatický sektor

Tyto jezové uzávěry jsou v České republice běžně používané a lze si představit jejich použití pro plánovaný jez. V celku rozšířený válcový uzávěr se dnes již nenavrhuje, proto nebyl uvažován. Naopak dnes hojně navrhovaný vakový uzávěr se principiálně nehodí. Je vhodnější spíše pro méně významné jezy. Vakový jez má nižší životnost a je citlivý např. na cílený útok vandalů. Takový útok by snadno přerušil provoz na vodní cestě.

Každá varianta byla podle jednotlivých kritérií ohodnocena body od 0 do 10. Čím vyšší body varianta získala, tím pozitivněji splňuje dané kritérium. U každé varianty byly získané body vynásobeny s váhou daného kritéria a sečteny. Varianta s nejvyšším počtem vážených bodů je považována za nejvhodnější variantu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 6). Odůvodnění hodnocení je popsáno v kapitole níže.

Tabulka 6: Bodování jednotlivých variant jezového uzávěru

Č.	Kritérium	Váha [ví]	A		B		C	
			body	bij*vi	body	bij*vi	body	bij*vi
1	Spolehlivá funkce při povodni	0.03	6	0.20	10	0.33	10	0.33
2	Jemná regulace hladiny	0.14	10	1.43	3	0.43	10	1.43
3	Spotřeba betonu	0.02	8	0.18	3	0.07	3	0.07
4	Spotřeba oceli	0.07	9	0.59	3	0.20	3	0.20
5	Zemní práce	0.01	5	0.05	7	0.08	7	0.08
6	Typizace	0.07	8	0.53	6	0.40	6	0.40
7	Průchod ledů	0.11	8	0.88	2	0.22	7	0.77
8	Průchod splavenin	0.05	3	0.16	10	0.55	10	0.55
9	Výška konstrukce	0.10	10	0.99	2	0.20	2	0.20
10	Vliv na životní prostředí	0.11	8	0.88	5	0.55	5	0.55
11	Rovnoměrné roznášení sil na spodní stavbu	0.09	6	0.53	3	0.26	3	0.26
12	Životnost a údržba	0.12	6	0.73	8	0.97	7	0.85
13	Jednoduché těsnění	0.02	4	0.09	9	0.20	7	0.15
14	Kapacita	0.05	8	0.44	5	0.27	5	0.27
Užitnost			7.67		4.71		6.10	
Pořadí			1		5		3	

Pokračování tabulky 6: Bodování jednotlivých variant jezového uzávěru

Č.	Kritérium	Váha [ví]	D		E		F	
			body	bij*vi	body	bij*vi	body	bij*vi
1	Spolehlivá funkce při povodni	0.03	9	0.30	9	0.30	5	0.16
2	Jemná regulace hladiny	0.14	3	0.43	10	1.43	6	0.86
3	Spotřeba betonu	0.02	2	0.04	2	0.04	6	0.13
4	Spotřeba ocele	0.07	6	0.40	5	0.33	2	0.13
5	Zemní práce	0.01	7	0.08	6	0.07	3	0.03
6	Typizace	0.07	3	0.20	3	0.20	3	0.20
7	Průchod ledů	0.11	2	0.22	7	0.77	8	0.88
8	Průchod splavenin	0.05	10	0.55	10	0.55	2	0.11
9	Výška konstrukce	0.10	3	0.30	3	0.30	10	0.99
10	Vliv na životní prostředí	0.11	6	0.66	6	0.66	10	1.10
11	Rovnoměrné roznášení sil na spodní stavbu	0.09	3	0.26	3	0.26	10	0.88
12	Životnost a údržba	0.12	6	0.73	5	0.60	5	0.60
13	Jednoduché těsnění	0.02	8	0.18	6	0.13	2	0.04
14	Kapacita	0.05	5	0.27	5	0.27	8	0.44
Užitnost			4.60		5.91		6.56	
Pořadí			6		4		2	

3.1.4.1 Poznámky k hodnocení

1) Spolehlivá funkce při povodni

U klapkového uzávěru jsou rizikové podtlaky, které vznikají pod klapkou při jejím sklápění. Tyto podtlaky dokáží při špatném návrhu klapku poškodit.

Stavidlový a segmentový uzávěry mají pohyblivé mechanismy umístěny nad hladinou Q_{100} , tudíž jejich funkce není tolik ohrožena. U segmentového uzávěru je snížen bod z důvodu problematického umístění otočného čepu, který by nemohl být umístěn nad hladinu Q_{100} z důvodu neekonomičnosti.

Funkce hydrostatického sektoru je omezena při nízkých rozdílech horní a dolní vody, což je problematické, protože u jezu Radotín se hladiny vyrovnávají už při průtoků s dobou opakování Q_1 - Q_2 .

2) Jemná regulace hladiny

Obecně uzávěry přelévané mají jemnější regulační schopnost, než ty podtákané na základě hydraulických zákonností. Proto segmentové a stavidlové uzávěry získaly nižší hodnocení než klapka a sektor. Nasazení klapky na stavidlový nebo segmentový uzávěr tento nedostatek eliminuje.

Pokud se porovná klapka a sektor, tak výrazně přesnějšího ovládní dosahuje klapkový uzávěr. To je způsobeno tím, že je klapka ovládaná přesnějšími hydromotory, zatímco sektor prostým přetlakem vody.

3) Spotřeba betonu

Rozdíly ve variantách určují zejména rozměry pilířů. U variant se stavidlem a segmentem je nutné počítat se dvěma návodními pilíři, naopak sektorový a klapkový uzávěr umožňuje větší světlost polí, proto je možné navrhnout jen jeden návodní pilíř. Zároveň sektorový a klapkový uzávěr vyžaduje pilíře o nejmenší šířce. Segmentový a stavidlový jez vyžaduje vysoké pilíře.

4) Spotřeba oceli

Konstrukce jednotlivých uzávěrů mají různou spotřebu oceli. Teoretická spotřeba oceli jednotlivých uzávěrů je uvedena v tabulce níže (Tabulka 7). Spotřeba oceli na jezový uzávěr velmi záleží na správném návrhu uzávěru a při různých použití se může velmi lišit. Pro tento orientační výběr ale postačí zmíněné teoretické spotřeby oceli.

Tabulka 7: Odhad spotřeby oceli na jezový uzávěr dle typu uzávěru [27][29]

Uzávěr	Teoretická spotřeba oceli	Odhad spotřeby oceli na jezové uzávěry
	[kg/m ² hrazené plochy]	[t]
Stavidlo	500	99.0
Segment	360	71.3
Klapka	260	51.5
Hydro. sektor	540	106.9

5) Zemní práce

Objem zemních prací souvisí hlavně s hloubkou založení. Nejnižší hodnocení získal sektor, který vyžaduje hlubokou spodní stavbu pro uložení tlačné komory. U podpírané klapky je nutné počítat s přístupem ke tlačným komorám, což se nejvhodněji řeší revizní chodbou ve spodní stavbě, to zvyšuje potřebnou hloubku založení.

6) Typizace

Typizace byla hodnocena podle počtu použití jednotlivých uzávěrů na pohyblivých jezích v České republice (Tabulka 8). Z tohoto porovnání vyplývá, že klapkové a stavidlové uzávěry převládají nad dalšími typy jezových uzávěrů.

Vyšší ohodnocení získal klapkový uzávěr, který se v současnosti hojně navrhuje. Navíc je často využíván na Vltavské vodní cestě, kde se osvědčil.

Tabulka 8: Orientační přehled typů pohyblivých jezů v České republice

Jez	Počet
Klapkový	63
Stavidlový	63
Segmentový	6
Válcový	15
Hydrostatický	8

7) Průchod ledů

Přelévané uzávěry nebo uzávěry s nasazenou klapkou umožňují průchod ledů. Převádění ledů zdvižnými uzávěry je téměř nemožné.

8) Průchod splavenin

Průchod splavenin je výhodnější u zdvižných uzávěrů. U přelévaných uzávěrů je nutné pro průchod splavenin vyhradit celé jezové pole. To přináší velké ztráty objemu vody ve zdrži.

9) Výška konstrukce

Předpokládaná výška konstrukce klapkového a sektorového jezu je 1,0 m nad úrovní hladiny zdrže, výška konstrukce stavidlového jezu je 10,7 m nad úrovní hladiny zdrže a u segmentového jezu 8,5 m nad hladinou zdrže. Výšky konstrukce jsou dány zejména nutností vyhradit segment či stavidlo 1 m nad úroveň povodně Q_{100} .

10) Vliv na životní prostředí

Do krajiny nejlépe zapadají nízké nenápadné konstrukce, proto byly kladně hodnoceny nízké konstrukce klapkového a sektorového jezu. Sektorový jez vzhledem připomíná pevný jez, který je běžnou součástí české krajiny, proto byl vyhodnocen nejlépe. U podpíraného klapkového jezu bylo vzato v potaz i riziko úniků oleje z hydromotorů. Podobně bylo negativně hodnoceno riziko úniku maziva z otočného čepu segmentového jezu.

11) Rovnoměrné roznášení sil na spodní stavbu

Nejnižší hodnocení získaly varianty se stavidlem a segmentem, u kterých síly působící na uzávěr jsou roznášeny koncentrovaně do pilířů. Hydrostatický sektor přenáší síly rovnoměrně po celé své délce, proto dostal nejvyšší hodnocení. Klapkový uzávěr roznáší síly do několika ložisek klapky, ale nejvyšší síly působí v ložiskách hydromotorů.

12) Životnost a údržba

U podpíraného klapkového jezu je nutné kontrolovat komory hydromotorů, zda nedochází k jejich zanášení, což by mohlo vést k zablokování hydromotoru. Problematická také může být kontrola hydromotorů kvůli únikům oleje [28]. Průlezné otvory v klapce umožňují snadnou revizi, popřípadě provedení nátěrů uzávěru.

U variant se segmentem bylo bráno v potaz technicky problematické umístění čepu, který by nebylo možné umístit nad hladinu Q_{100} . Čep by byl umístěn kolem úrovně hladiny Q_5 a po každém průchodu povodně by se musel očistit a promazat.

V tlakové komoře hydrostatického sektoru se usazují sedimenty, které je nutné odstraňovat.

Do bodování byla zahrnuta také skutečnost, že všechny ocelové části musejí být pravidelně natírány ochrannými nátěry. Obecně se lépe natírají rovinné jednoduché plochy než ty členěné.

13) Jednoduchost těsnění

Základní těsnění jezových uzávěrů je boční a prahové. U stavidla a segmentu je prahové těsnění snadno řešitelné břitovým těsněním. U klapky a sektoru je prahové těsnění o něco složitější. Složitost bočního těsnění je u všech jezových uzávěrů podobná.

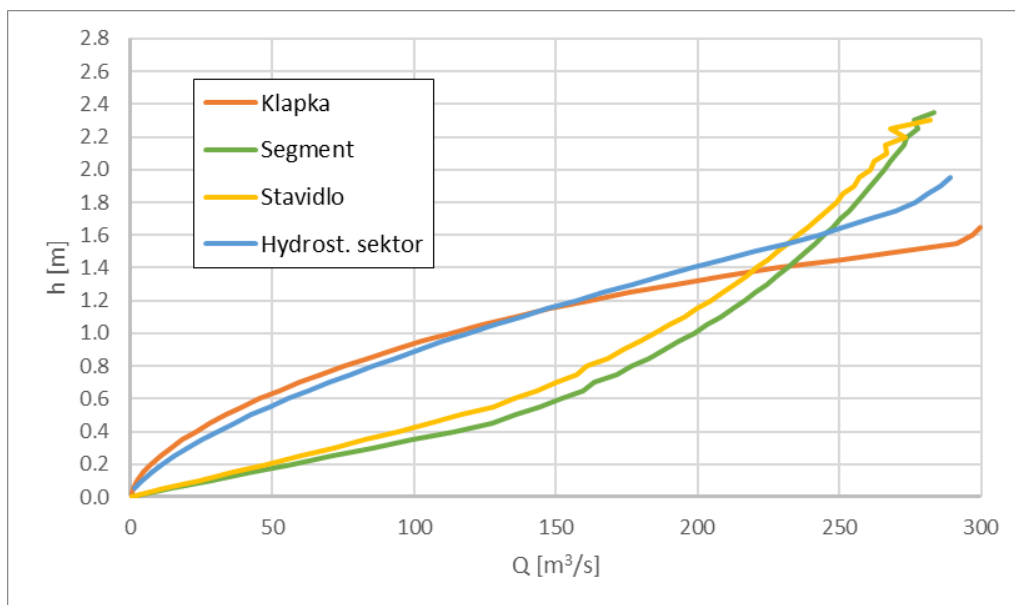
Varianty uzávěru s nasazenou klapkou jsou složitější na těsnění než uzávěr bez nasazené klapky, jelikož je nutné zajistit těsnění mezi uzávěrem a nasazenou klapkou. Také je třeba řešit boční těsnění klapky.

Celkově nejsložitější těsnění je u sektoru, protože pro jeho správnou funkci je klíčové těsnění tlačné komory.

14) Kapacita

K vyhodnocení kapacity jezu byly spočteny měrné křivky jednotlivých uzávěrů (Obrázek 15) při vyhrazování všech polí jezu současně na modelovém jezu o 3 polích o světlosti 20 m umístěného v profilu plánovaného jezu Radotín. Postup výpočtů je popsán v kapitole 5.3. Z porovnání měrných křivek vychází, že kapacita jezu na základě uzávěru je ve všech variantách shodná. To je způsobeno velkým ovlivněním přepadu dolní vodou. Při průtoku cca $360 \text{ m}^3/\text{s}$ dochází k vyrovnání hladiny zdrže a hladiny dolní vody.

Do hodnocení byla zahrnuta i výška a šířka pilířů. Vysoké a široké pilíře, které navíc vyčnívají nad úroveň povodně, snižují průtočnou plochu více než nízké pilíře, které jsou při povodních rychle zatopeny.



Obrázek 15: Porovnání měrných křivek dle typu uzávěru pro jez o 3 polích po 20 m

3.1.4.2 Závěr výběru jezového uzávěru

Jako nejvhodnější varianta uzávěru vzešla ze srovnání varianta A – podpíraný klapkový uzávěr. Na druhém místě skončila varianta F – hydrostatický sektor. Naopak nejméně vhodným uzávěrem se ukázal segment bez nasazené klapky.

V dalším postupu navrhování bude již uvažována pouze varianta s klapkovým uzávěrem.

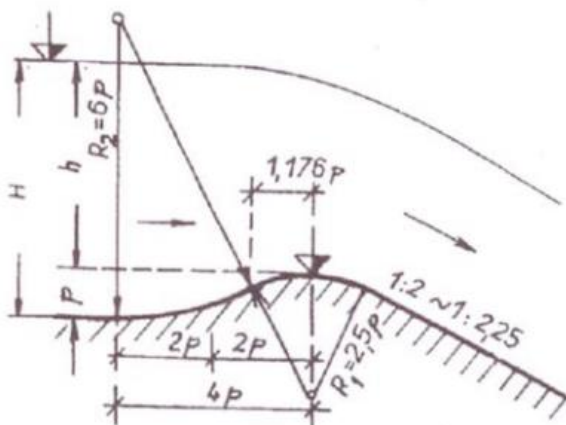
3.2 Výška Jamborova prahu a počet polí

V této kapitole bude zvolena výška Jamborova prahu a bude proveden výběr počtu a šířky jezových polí.

3.2.1 Jamborův práh

Jamborův práh je hojně používaná konstrukce spodní stavby pohyblivých jezů. Je tvořen ze dvou protisměrných válcových ploch (Obrázek 16). Jeho předností je, že díky jeho výhodné geometrii způsobuje jen nepatrné vzduť hladiny před prahem. Také netvoří překážku při průchodu splavenin.

V původní předprojektové přípravě [14] byla navrhována výška Jamborova prahu 1,2 m a hrazená výška klapky 3,3 m. V bakalářské práci je zvažováno zvýšení Jamborova prahu na 1,4 m; 1,6 m; 1,8 m a 2,0 m. Zvýšení Jamborova prahu povede k úspoře oceli potřebné na jezový uzávěr, ale naopak zvýší spotřebu betonu a ovlivní kapacitu jezu. Ocel je v porovnání s betonem dražší materiál, proto by zvýšení prahu mělo přinést úspory nákladů.

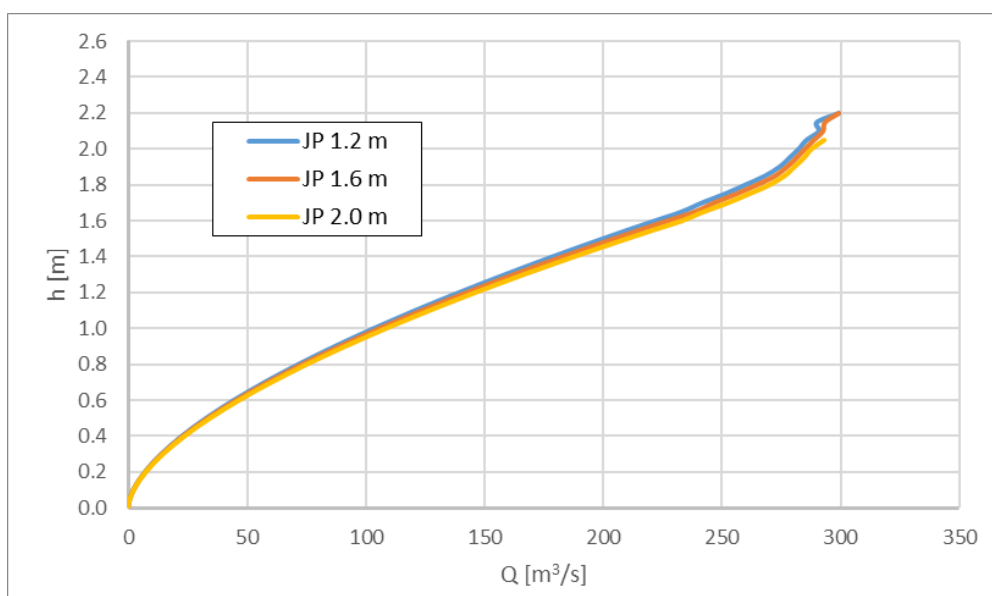


Obrázek 16: Geometrie Jamborova prahu [28]

3.2.1.1 Změna průtočné kapacity vlivem zvýšení Jamborova prahu

Pro ověření předpokladu na snížení kapacity jezu vlivem zvýšením Jamborova prahu byly vypočítány měrné křivky v závislosti na jeho výšce (Obrázek 17) při běžné úrovni hladiny zdrže. Pro přehlednost grafu nejsou vykresleny všechny mezilehlé varianty výšky Jamborova prahu. Měrné křivky byly zpracovány pro jez o dvou polích po 30 m hrazený klapkami, kdy se všechny klapky současně sklápí.

Z výpočtů vyplývá, že při nominální hladině zdrže nenastane vlivem zvýšení Jamborova prahu žádné snížení kapacity. Tento fakt se dá vysvětlit velkým ovlivněním přepadu dolní vodou.



Obrázek 17: Porovnání měrných křivek v závislosti na výšce Jamborova prahu

Posouzení, zda nenastane snížení kapacity při povodňových stavech, kdy se hladina horní a dolní vody vyrovná, by si vyžadovalo podrobné modelování. V práci bylo toto posouzení velmi zjednodušeno. Byl využit předpoklad, že Jamborův práh způsobí jen zanedbatelné vzdutí, za stavech, kdy poměr výšky Jamborova prahu (p) a hloubky vody

před ním je v rozmezí (0,15 – 0,25) [28]. Jednotlivé poměry byly spočteny při běžné úrovni hladiny zdrže a při povodňových stavech Q_5 , Q_{20} a Q_{100} (Tabulka 9).

Dalším předpokladem, který umožňuje zvýšit výšku Jamborova prahu je skutečnost, že významná část povodňových průtoků bude převáděna rozsáhlou inundací mimo jezová pole.

Z výpočtů vyplývá, že žádná navržená výška Jamborova prahu u povodně Q_{100} by neměla snižovat kapacitu jezového profilu. Jamborův práh o výšce 2,0 m by již mohl představovat potencionální zásadnější snížení povodně Q_{20} .

Tabulka 9: Poměry výšky Jamborova prahu a hloubky vody před ním v závislosti na povodňových průtocích

Výška Jam. prahu (p)	p/H_{nom}	p/HQ_5	p/HQ_{20}	p/HQ_{100}
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]
1.20	0.27	0.20	0.16	0.14
1.40	0.31	0.23	0.19	0.16
1.60	0.36	0.27	0.22	0.19
1.80	0.40	0.30	0.25	0.21
2.00	0.44	0.33	0.27	0.23

3.2.1.2 Spotřeba materiálů

Beton

Vyšší spotřeba betonu při zvyšování Jamborova prahu je zapříčiněna nejen samotným zvýšením spodní stavby, ale také prodloužením spodní stavby směrem do zdrže kvůli zachování geometrie Jamborova prahu. Stejně tak je nutné prodloužení pilířů do zdrže, tak aby bylo zachováno optimální obtékání pilíře. Prodloužení spodní stavby přináší pozitivum v podobě prodloužení průsakové dráhy, což povede ke snížení průsaků pod jezem a vztakových sil působících na spodní stavbu.

Hrazená výška

Hrazená výška klapky v navržených variantách se pohybuje v závislosti na výšce Jamborova prahu od 2,5 m do 3,3 m v intervalech po 0,2 m. Hrazená výška 3,3 m je dle typizační směrnice zpracované Hydroprojektem [31] typizovaný rozměr.

U jednotlivých variant výšky Jamborova prahu a počtu přelivných polí byla spočtena spotřeba betonu, hrazená plocha klapky a objem zemních prací. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 10). Ve výpočtech je zahrnuta jen jezová část s pilíři bez vývaru a úprav břehů.

Tabulka 10: Spotřeba materiálů jednotlivých variant výšky Jamborova prahu a počtu polí

Přelivné pole		Výška Jam. Práhu	Hrazená výška	Hrazená šířka	Beton spodní stavba	Délka pilíře	Beton na pilíře	Celkem beton	Hrazená plocha klapky	Zemní práce
Počet	Šířka [m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /m]	[m]	[m ³]	[m ³]	[m ²]	[m ³]
3	20	1.2	3.3	20	51.63	26.30	474.8	4 047	198	5 947
3	20	1.4	3.1	20	54.47	27.10	484.5	4 237	186	6 000
3	20	1.6	2.9	20	57.96	27.90	494.1	4 465	174	6 053
3	20	1.8	2.7	20	61.17	28.70	494.1	4 659	162	6 106
3	20	2.0	2.5	20	64.64	29.50	513.2	4 905	150	6 158
2	30	1.2	3.3	15	51.63	26.30	474.8	3 573	198	5 947
2	30	1.4	3.1	15	54.47	27.10	484.5	3 753	186	5 998
2	30	1.6	2.9	15	57.96	27.90	494.1	3 971	174	6 048
2	30	1.8	2.7	15	61.17	28.70	494.1	4 165	162	6 098
2	30	2.0	2.5	15	64.64	29.50	513.2	4 392	150	6 149

Na základě výpočtu spotřebovaných materiálů a objemu zemních prací byly vyčíslené náklady jednotlivých variant. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách (tabulka 12 a tabulka 13), přičemž jednotlivé varianty jsou porovnány s výškou Jamborova prahu 1,2 m, která je navržena v původní předprojektové přípravě [14] (tato varianta je uvedena v prvním řádku tabulky). V dalších řádcích jsou uvedeny pouze jejich rozdíly.

Ceny jednotlivých položek (Tabulka 13) jsou převzaty z rozpočtu [32], který pochází z roku 2006. Ceny tedy nejsou aktuální, ale v tomto případě je důležitější spíše vzájemný poměr cen než absolutní cena.

Vybraná varianta výšky Jamborova prahu 1,8 m při variantě 2 pole po 30 m přivede úsporu na ceně materiálu přibližně 790 000 Kč v porovnání s variantou uvedenou v původní předprojektové přípravě.

Za předpokladu, že cena betonu se na světových trzích od roku 2006 zvýšila asi o 40 % [33] a cena oceli asi o 200 % [34], tak výsledná úspora k dnešním cenám by mohla dosahovat přibližně 3,1 mil. Kč. Tato hodnota je ale velmi spekulativní, pro přesnou cenu by bylo nutné sestavit propočtení s aktuálními cenami a v závislosti na nabídkách od výrobců.

Tabulka 11: Porovnání nákladů jednotlivých variant a)

Přelivné pole		Výška Jam. prahu	Hrazená výška	Beton	Klapka	Zemní práce	Bilance
Počet	Šířka [m]	[m]	[m]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
2	30	1.2	3.3	16 255 362	19 220 348	422 247	35 897 956
2	30	1.4	3.1	+819 409	-1 164 870	+3 578	-341 882
2	30	1.6	2.9	+1 814 358	-2 329 739	+7 157	-508 224
2	30	1.8	2.7	+2 693 172	-3 494 609	+10 735	-790 701
2	30	2.0	2.5	+3 726 450	-4 659 478	+14 314	-918 715

Tabulka 12: Porovnání nákladů jednotlivých variant b)

Přelivné pole		Výška Jam. prahu	Hrazená výška	Beton	Klapka	Zemní práce	Bilance
Počet	Šířka [m]	[m]	[m]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
3	20	1.2	3.3	18 415 734	19 220 348	422 247	38 058 328
3	20	1.4	3.1	+863 499	-1 164 870	+3 749	-297 622
3	20	1.6	2.9	+1 901 991	-2 329 739	+7 498	-420 251
3	20	1.8	2.7	+2 780 805	-3 494 609	+11 246	-702 557
3	20	2.0	2.5	+3 901 170	-4 659 478	+14 995	-743 313

Tabulka 13: Ceny jednotlivých položek z roku 2006 [32]

Položka	MJ	Jednotková cena
Konstrukce z ŽB vodostavebného C30/37 XF3	m ³	4 550.00 Kč
Hradící těleso dutá klapka	m ²	97 072.46 Kč
Zemní práce tř. 1 a 2 objem do 10 000 m ³	m ³	71.00 Kč

3.2.1.3 Závěr výšky Jamborova prahu

Na základě propočtů popsanych v kapitolách (3.2.1.1 a 3.2.1.2) byla vybrána jako neoptimalnější výška Jamborova prahu 1,8 m. Ta povede k nejnižší nákladům a zároveň by neměla zhoršit odtokové poměry při povodňových průtocích Q_{20} a Q_{100} . Hrazená výška klapkového uzávěru odpovídá 2,7 m.

3.2.2 Počet a velikost polí

V uspořádání jezu byly uvažovány dvě varianty a to:

- 2 pole po 30 m, hrazené dělenou klapkou 2x15 m.
- 3 pole po 20 m, hrazené nedělenou klapkou o šířce 20 m

Obě varianty jsou uvedeny v předprojektové přípravě [14]. K variantě a) je zde uveden předpoklad lepšího převádění ledů než u varianty b). Naopak varianta b) disponuje lepším převáděním povodňových průtoků při opravách jednoho jezového pole.

V bakalářské práci byla zvolena varianta a) 2 pole po 30 m, a to jednak z důvodu zmíněného lepšího převádění ledů, tak také z ekonomického hlediska. Varianta a) oproti variantě b) uspoří jeden návodní pilíř, což sníží spotřebu betonu. Jednotlivé uzávěry budou také méně zatěžované, tím bude snížena spotřeba oceli na jezový uzávěr. Na druhou stranu varianta a) vyžaduje vyšší počet hydromotorů a to 8 oproti 6, ale jejich požadovaná dimenze bude menší.

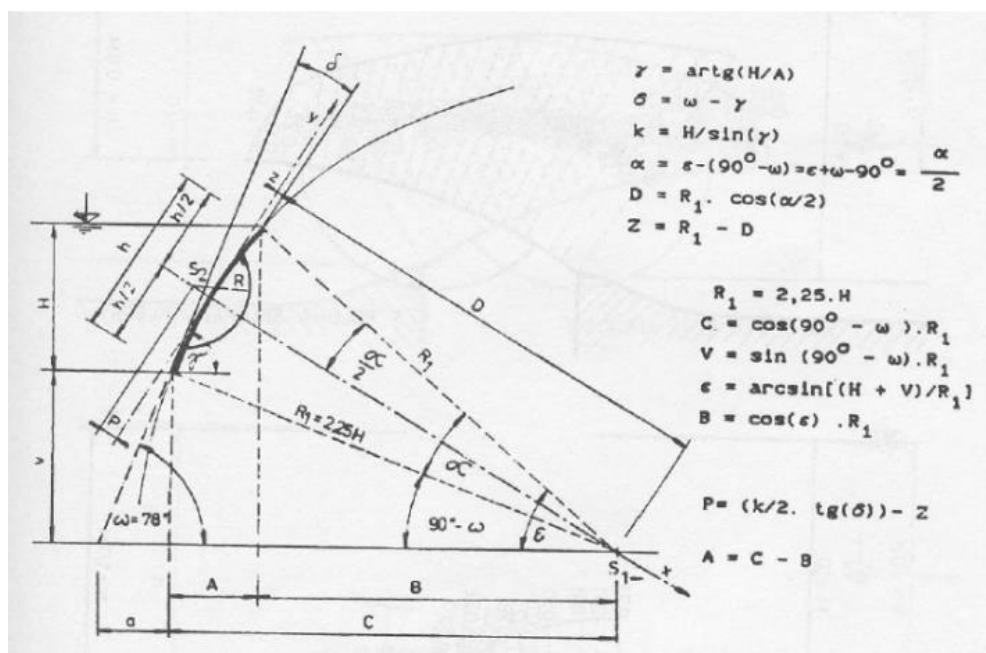
S menší dělenou klapkou se bude také lépe manipulovat při jejím ukládání, či při případných opravách. Snadnější bude také doprava klapky na stavbu. Čtyři dělené klapky, které se mohou pohybovat nezávisle na sobě, zvýší variabilitu v manipulacích jezu. Bude např. umožněn převod splavenin za menších ztrát vody.

4. Návrh a posouzení klapkového uzávěru

4.1 Rozměry navržené duté klapky

Pro zvolenou variantu jezového uzávěru a výšky Jamborova prahu bylo nutné navrhnout dohromady 4 klapkové uzávěry s hradicí výškou 2,7 m a šířkou 15 m.

Geometrie duté klapky byla navržena podle doporučeného tvaru (Obrázek 18) dle typizační směrnice [31]. Základní parametry navržené klapky jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 14). Nosná konstrukce klapky je vyztužena 7 diafragmat. Vzdálenost diafragmat je 2,8 m. Vzdálenost krajních diafragmat je snížena na 1,4 m. Hradicí plech je zpevněn úhelníky.

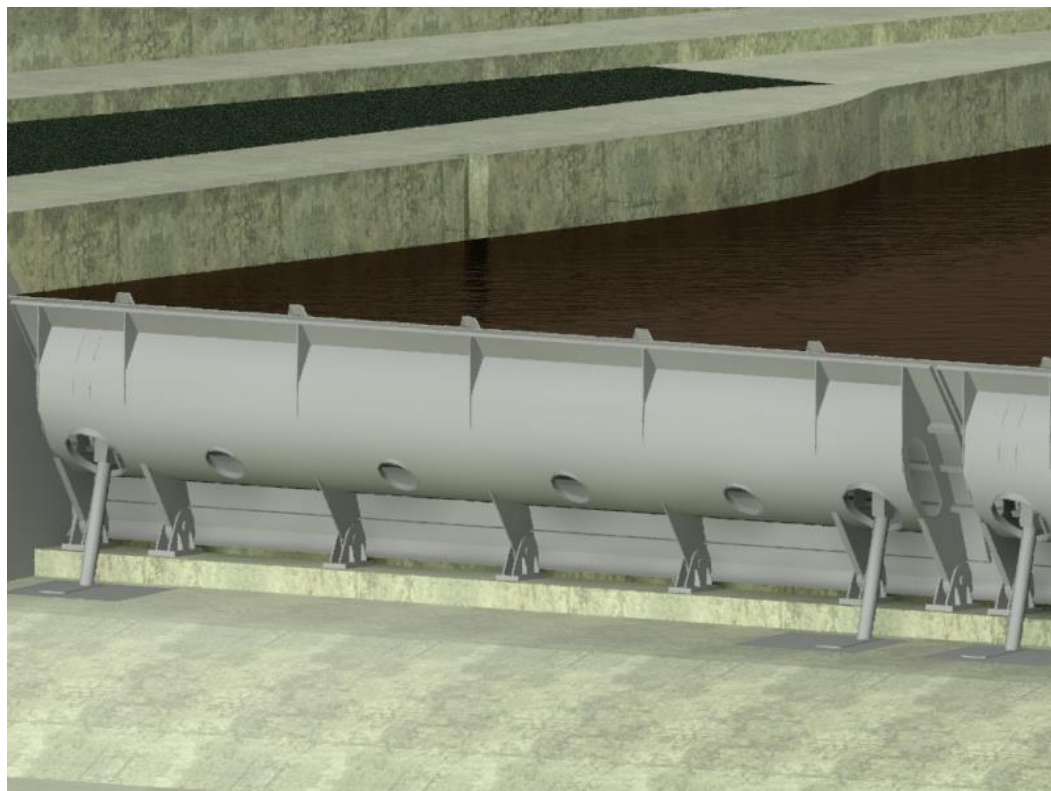


Obrázek 18: Doporučený tvar příčného řezu duté klapky [31]

Tabulka 14: Základní parametry navrženého klapkového uzávěru

Základní parametry navrženého klapkového uzávěru		
H	Hradicí výška	2.7 m
B	Hradicí šířka	15 m
ω	Vztyčný úhel	78°
R_1	Poloměr zakřivení hradicího plechu	6.075 m
R_2	Poloměr výztužné stěny	1.2 m
t_{hp}	Tloušťka hradicího plechu	10 mm
t_d	Tloušťka diafragmat	16 mm
t_t	Tloušťka výztužné stěny	12 mm
m	Vlastní hmotnost konstrukce	14 862 kg

Vizualizace podoby navržené klapky je vyzobrazena na obrázku níže (Obrázek 19).

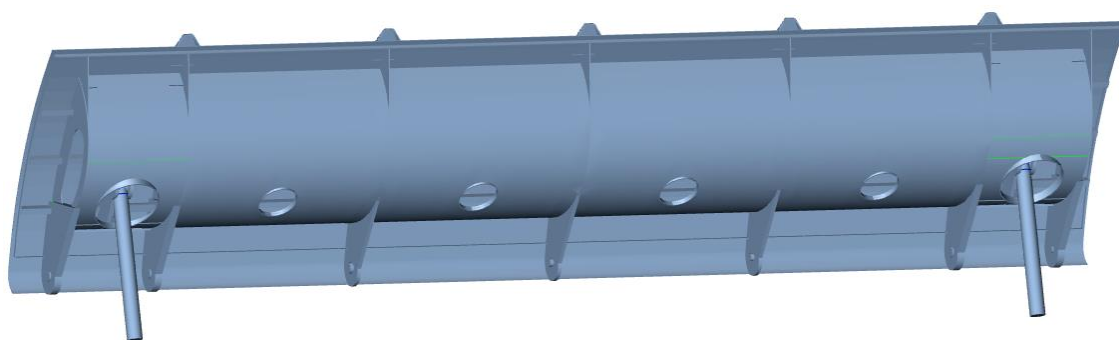


Obrázek 19: Vizualizace klapkového uzávěru (bez dolní vody)

4.2 Posouzení klapkového uzávěru

Navržený klapkový uzávěr byl vymodelován v programu SCIA Engineer 20 (Obrázek 20), který umožňuje provedení statického výpočtu. Při posuzování byl kladem důraz především na velikost deformací. Konstrukce byla posuzována ve třech stavech:

- Plné zahrazení – hydrostatický tlak
- Mezipoloha klapky (sklopení o $0,6 H$) – hydrodynamický tlak
- Úplné sklopení – hydrodynamický tlak



Obrázek 20: Model klapkového uzávěru v programu SCIA Engineer 20 [35]

4.2.1 Hydrostatický tlak

Součinitel spolehlivosti pro hydrostatický tlak $\gamma_F = 1,0$ [36]. Hodnota hydrostatického tlaku v konkrétní hloubce se spočte dle vztahu 4.1.

Výpočet hydrostatického tlaku:

$$p = h \cdot \gamma_v \quad (4.1)$$

Kde: p – hydrostatický tlak [kPa]

h – hloubky vody [m]

γ_v – objemová tíha vody (uvažováno 10 kN/m³)

4.2.2 Hydrodynamický tlak

Pro posouzení duté klapky byly využity data z hydrotechnického výzkumu katedry Hydrotechniky ČVUT [28]. Výzkum vedený panem profesorem Jaroslavem Čábelkou byl prováděn na modelové klapce pro úhel vztyčení 68,10°, kde bylo měřeno její zatížení hydrodynamickými tlaky. Hydrodynamický tlak se měřil ve 24 piezometrů umístěných na modelové klapce v 11 různých polohách klapky (polohy v násobcích hradící výšky).

Pro výpočet byly hodnoty hydrodynamický tlaků přepočítány na hradící výšku navrhované klapky a vynásobeny součinitelem spolehlivosti pro hradící konstrukce namáhané hydrodynamickým tlakem $\gamma_F = 1,2$ [36]. Průběh hydrodynamického tlaku byl zjednodušen a do výpočtu byla zařazena každá druhá hodnota z výzkumu.

Uzávěr byl takto zatížen ve dvou polohách – úplné sklopení a sklopení o 0,6 H, kde je dle literatury [28] předpokládáno největší zatížení hradící konstrukce.

Dolní voda je v obou případech předpokládána na 0,9 H, což je dle hodnot z výzkumu nejnejpříznivější stav.

4.2.3 Vyhodnocení

Z výstupu vyplývá, že nejnejpříznivější stav nastává při úplném sklopení uzávěru. Při tomto stavu je maximální deformace konstrukce 14,7 mm. Tato deformace nastává na vrcholu hradícího plechu v prostřední části uzávěru. Velikosti maximálních deformací jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 15). Velikost deformací je malá a nepředstavuje překážku v použitelnosti uzávěru.

Dále byly vyhodnoceny síly působící v ložiskách (Tabulka 16). Nejvíce namáhaná ložiska jsou ložiska hydromotorů a krajní ložiska 1 a 2, které jsou navíc namáhány, na rozdíl od zbylých ložisek, na tah. Tato ložiska byla v návrhu zesílena.

Podrobnější výstupy z posuzování deformací jsou uvedeny v přílohách A.1, A.2 a A.3.

Nejzatíženější diafragmou se ukázala být ta krajní. Velikost hlavních napětí a maximálního smykového napětí na této diafragmě je vykresleno v příloze A.4.

Tabulka 15: Maximální posun na zatíženém uzávěru

Manipulace	U_{total}
	[mm]
Plné zahrazení	5.8
Sklopení o 0,6H	9.8
Max. sklopení	14.7

Tabulka 16: Síly působící v ložiskách v kN

Síla v ložiskách	1		2		3		4		Hydromotor		
Směr reakce	y	z	y	z	y	z	y	z	y	z	N
Plné zahrazení	-6.2	-221.2	-45.6	-130.0	-97.6	57.7	-106.7	67.5	-110.6	450.3	-463.7
Sklopení o 0,6H	-73.7	-258.5	-22.1	-89.3	-20.8	172.4	-39.8	196.9	-68.8	640.1	-643.8
Max. sklopení	-33.8	-326.8	126.0	-192.4	105.6	149.4	90.9	190.9	-122.6	898.2	-906.4

4.3 Hydromotor

Ovládání každého klapkového uzávěru je zajištěno dvěma hydromotory 320/200, PN 32 MPa. Zdvih hydromotorů je 1 473 mm. Hydromotory jsou umístěny v samostatných komorách, do kterých je možný přístup z revizní chodby. Prostup je zajištěn vodotěsnými dveřmi. Vršek komory je zakrytý krytem, který brání zanesení komory sunutými splaveninami.

4.4 Zavzdušnění klapky

Proud přepadající vody přes klapku strhává vzduch pod ní, kde vzniká podtlak. Podtlak zvyšuje namáhání konstrukce a vytváří nežádoucí kmitání uzávěru. Zavzdušnění tento podtlak snižuje a tím eliminuje kmitání konstrukce. Průměr zavzdušňovacího potrubí se spočítá dle rovnice 4.4. Součinitelé, které v rovnici figurují se spočítají dle vztahů 4.2 a 4.3.

Součinitel c' :

$$c' = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_n}} \quad (4.2)$$

Součinitel k :

$$k = \frac{2c^{1.82}}{\sqrt{c'} \pi^4 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}} \quad (4.3)$$

Průměr zavzdušňovacího potrubí:

$$D = k \frac{h^{1,92} B^{0,5}}{0,55 p^{0,82}} \quad (4.4)$$

- Kde:
- c – součinitel, uvažováno = 0,077
 - $\Sigma \xi n$ – suma ztrát na potrubí (bráno 1,8)
 - ρ_1 – měrná hmotnost vzduchu [kg/m³]
 - ρ_2 – měrná hmotnost vody [kg/m³]
 - D – průměr zavzdušňovacího potrubí [m]
 - h – přepadová výška [m]
 - B – šířka uzávěru [m]
 - p – přípustný potlak (uvažováno 0,2 m)

Výpočet:

$$c' = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,8}} = 0,5976$$

$$k = \frac{2 \cdot 0,077^{1,82}}{\sqrt{0,5976 \cdot \pi} \cdot \sqrt[4]{\frac{1000}{1,29}}} = 2,602 \cdot 10^{-3}$$

$$D = 2,602 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2,7^{1,92} 15^{0,5}}{0,55 \cdot 0,2^{0,82}} = 0,296 \text{ m} \cong 0,3 \text{ m}$$

Potřebný průměr zavzdušňovacího potrubí je 300 mm. Zavzdušňovací trubky budou umístěny po stranách každého přelivného pole.

4.5 Těsnění klapky

Boční těsnění je provedeno notovou pryží, která je uchycena úhelníkem k uzávěru. Pryž doléhá na boční štít, který je umístěn na pilíři. Štít o tloušťce 6 mm je vyroben z teflonu a pod ním se nachází izolační vrstva o tloušťce 10 mm.

Boční těsnění mezi jednotlivými klapkami je řešeno obdobně. Na obou uzávěrech jsou umístěny notové pryže uchycené úhelníky k uzávěru. Notové pryže vodotěsně doléhají na sebe.

Prahové těsnění je řešeno pryží tvaru rozevřeného úhelníku, která je z jedné strany uchycena ke spodní stavbě. Volná strana je tlakem vody přitlačována ke spodní části hradícího plechu klapky, tím je zajištěna vodotěsnost.

5. Hydrotechnické výpočty

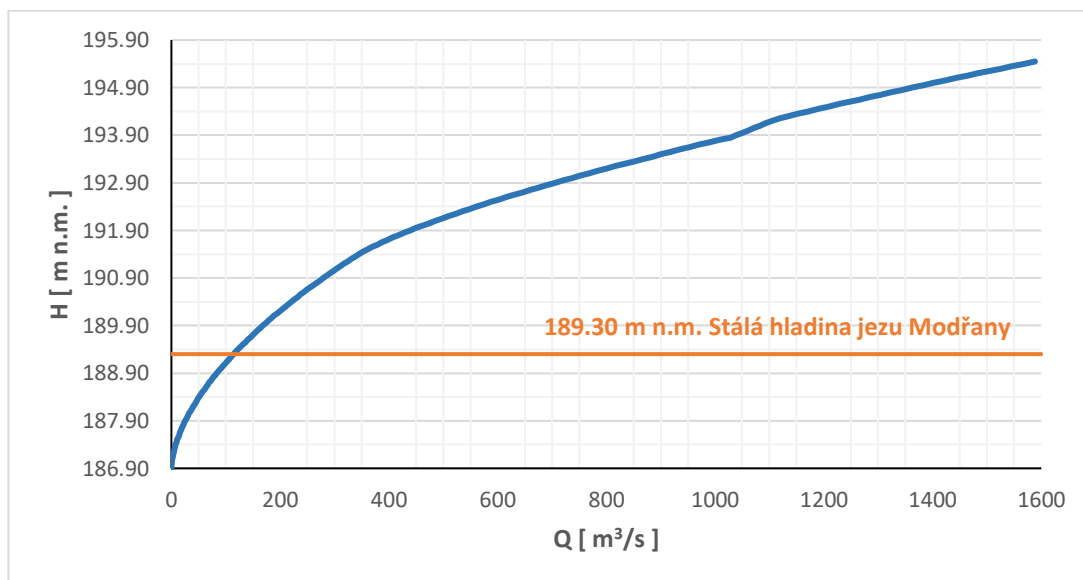
V této kapitole je zprvu sestavena měrná křivka koryta pod jezem, která poslouží jako okrajová podmínka v navazujících výpočtech. Dále je popsán tvar zhlaví návodního pilíře. Také je tu představen způsob výpočtu kapacity různých jezových uzávěrů, které byly využity v kapitole 3.1. U vybraného klapkového uzávěru je vykreslena měrná křivka při různých manipulacích.

V poslední části je navržen vývar jezu.

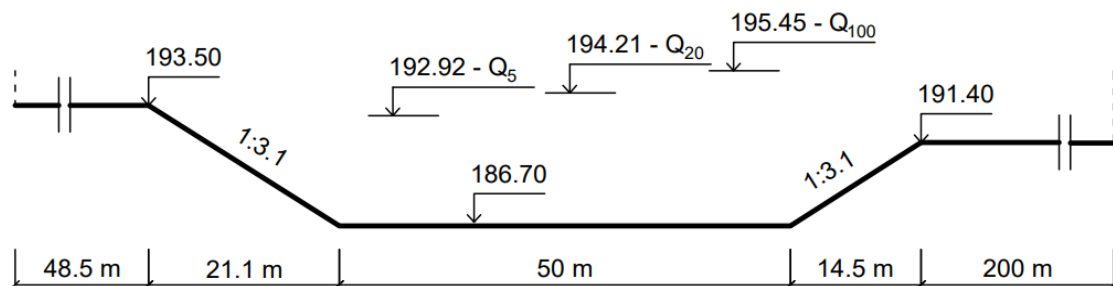
5.1 Měrná křivka dolní vody

Pro vyhotovení měrné křivky byl vytvořen zjednodušený model průtočného profilu pod jezem. Geometrie modelu vycházející z analýzy výškopisu a z mapy aktivních záplavových ploch je znázorněna na schématu (Obrázek 22). Model byl upraven tak, aby N-leté průtoky (Tabulka 2 v kapitole 2.4) odpovídaly známým hladinám Q_5 , Q_{20} , Q_{100} (Tabulka 4 v kapitole 2.4.2). Průtok Q_{20} byl dopočítán na základě logaritmické interpolace na hodnotu $1\,080\text{ m}^3/\text{s}$.

Ve výsledné měrné křivce (Obrázek 21) je vyznačena nominální hladina zdrže Modřany.



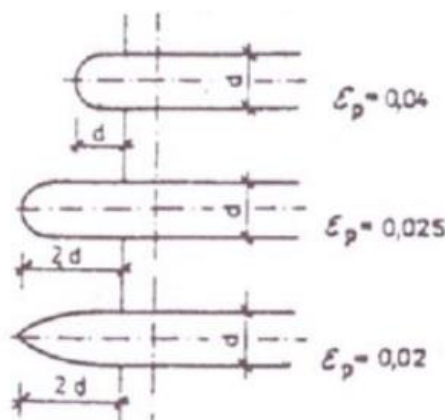
Obrázek 21: Měrná křivka koryta pod jezem vycházející ze zjednodušeného modelu



Obrázek 22: Zjednodušená geometrie profilu použitá pro model (2x převýšené) [37]

5.2 Návrh návodního pilíře

Šířka návodního pilíře je 3 m. Tato šířka je navržena s ohledem na zachování vodotěsnosti pilíře, protože je v něm uvažována spojovací šachta na vrchol pilíře. V původní předprojektové přípravě [14] je navrženo přední zhlaví půlkruhově zaoblené a zadní zhlaví lichoběžně zkosené. Přední zhlaví je předsazeno od začátku Jamborova prahu o dvojnásobnou šířku pilíře, tedy o 6 m. Jeho tvarový součinitel je $\varepsilon_p = 0,025$ dle obrázku (Obrázek 23).



Obrázek 23: Tvarové součinitele předního zhlaví a jejich předsazení [28]

V této práci je tvar předního zhlaví zachován půlkruhově zaoblený, ale zadní zhlaví je nahrazeno proudnicovým tvarem. Vliv proudnicového tvaru předního zhlaví by nebyl nějak zásadní, naopak je předpoklad, že úprava zadního zhlaví na proudnicový tvar by mohla zlepšit odtokové proudění, protože u jezů s nedokonalým přepadem je obecně právě tvar zadního zhlaví rozhodující [28]. Pro vyčíslení tohoto rozdílu by bylo vhodné provést výpočty na modelu. Tvarový součinitel zadního zhlaví je ve výpočtech uvažován $\varepsilon_z = 0$.

Proudnicový tvar zhlaví je navrhován pomocí štíhlostního poměru pilíře. Optimální štíhlostní poměr pilíře by podle hydrotechnických výzkumů byl $\lambda = 3,0\text{--}3,5$ [28]. Kvůli ekonomickým důvodům se navrhuje pilíře s poměrem $\lambda = 2,0\text{--}2,5$. Štíhlostní poměr je definován jako poměr teoretické délky pilíře a jeho šířky. V bakalářské práci je zvolen

štíhlostní poměr $\lambda = 2$, teoretická délka pak vychází na 6 m. Proudnicový tvar zadního zhlaví byl navrhnut dle souřadnic uvedených v tabulce níže (Tabulka 17). Zakončení pilíře je zkráceno o 60 cm zaoblenou válcovou plochou kvůli konstrukčním důvodům [28].

Tabulka 17: Souřadnice proudnicového tvaru zadního zhlaví pilíře [28]

x/l	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.95	1.00
y/d	1	0.976	0.905	0.782	0.6	0.347	0.187	0

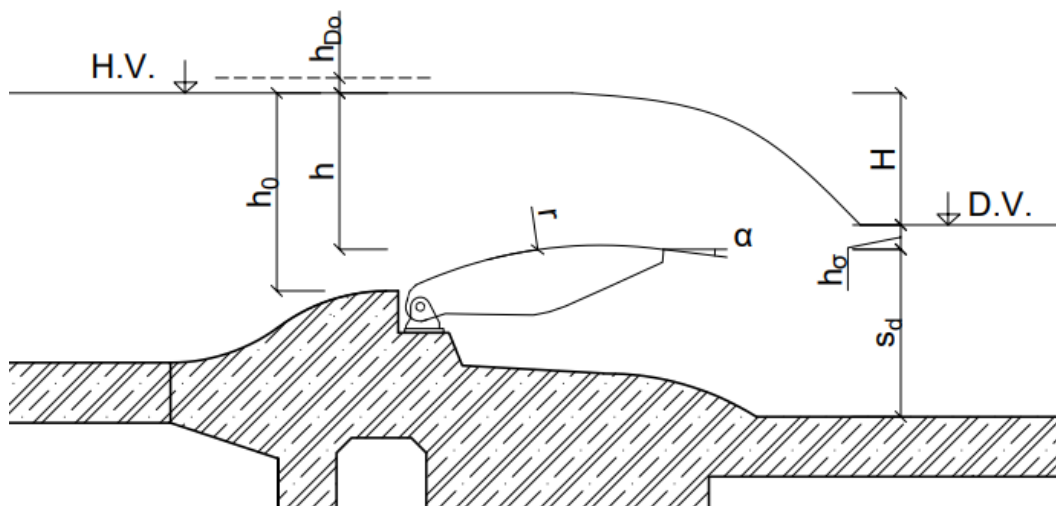
5.3 Výpočet kapacity jezových uzávěrů

V této kapitole je popsán způsob výpočtu průtoků různými uzávěry. Výsledky z výpočtů byly použity k rozhodování ve výběru jezového uzávěru (kapitola 3.1).

Pro vybranou variantu klapkového uzávěru je vypočítána měrná křivka, která je podkladem pro další výpočty.

5.3.1 Klapkový uzávěr

Měrná křivka klapkového uzávěru byla spočítána dle přepadové rovnice [24]. V rovnici byl použit rozšířený součinitel přepadu odečtený z příloženého grafu (Obrázek 24) a upraven dle rovnice na konkrétní přepadovou výšku (rovnice 5.2). Součinitel zatopení je získán z tabulky (Tabulka 18). Úroveň dolní hladiny je odečtena z měrné křivky (Obrázek 21).



Obrázek 24: Schéma pro výpočet přelivu přes klapku

Přepadová rovnice:

$$Q = \sigma_z M_h b_u (h + h_{Do})^{3/2} \quad (5.1)$$

Přepočtení rozšířeného součinitele přepadu:

$$M_h = M_{KL} \left(\frac{h}{h_0} \right)^{0.17} \quad (5.2)$$

Účinná šířka:

$$b_u = b_0 - (n\varepsilon_p + 2\varepsilon_k) \cdot h_0 \quad (5.3)$$

Kde: Q – průtok [m^3/s]

σ_z – součinitel zatopení [–]

M_h – rozšířený součinitel přepadu k výšce h [–]

b_u – účinná přepadová šířka [m]

h – přepadová výška jiná než návrhová [m]

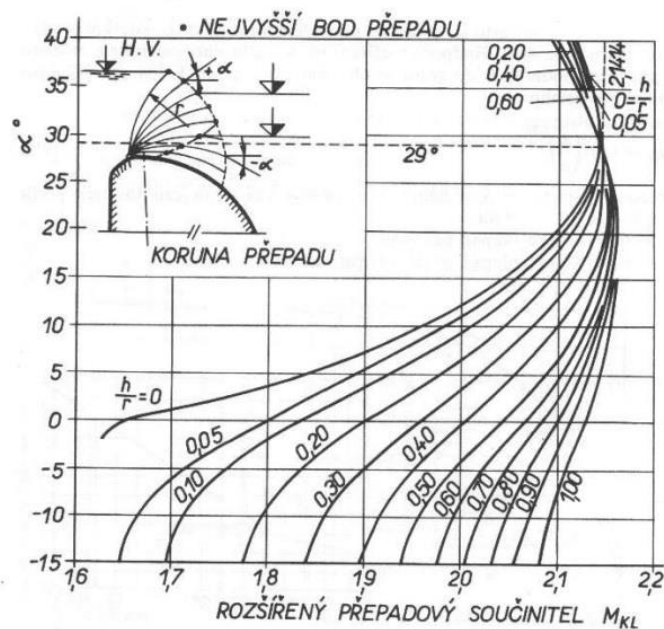
h_{D0} – rychlostní výška [m]

M_{KL} – rozšíření předpový součinitel [–]

h_0 – návrhová přepadová výška [m]

α – úhel sklopení klapky [°]

r – poloměr křivosti klapky [m]



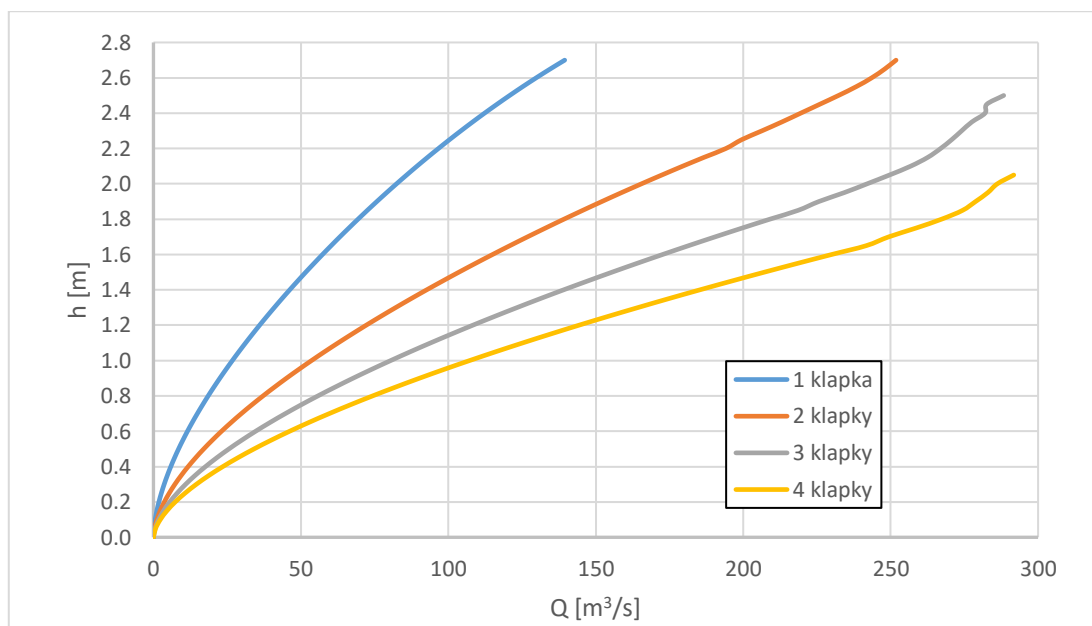
Obrázek 25: Graf pro určení rozšířeného přepadového součinitele M_{KL} pro klapku [27]

Tabulka 18: Součinitel zatopení σ_z [38]

$h\sigma/h$	σ_z	$h\sigma/h$	σ_z	$h\sigma/h$	σ_z	$h\sigma/h$	σ_z	$h\sigma/h$	σ_z
0.40	0.990	0.65	0.940	0.74	0.869	0.82	0.756	0.90	0.575
0.45	0.986	0.66	0.940	0.75	0.858	0.84	0.719	0.92	0.515
0.50	0.980	0.68	0.921	0.76	0.846	0.85	0.699	0.94	0.449
0.55	0.970	0.70	0.906	0.78	0.820	0.86	0.677	0.95	0.412
0.60	0.960	0.72	0.889	0.80	0.790	0.88	0.629	1.00	0.000

Výpočet počítá s dolní hladinou na úrovni nominální hladiny zdrže Modřany.

Popsaným způsobem nebylo možné průkazně spočítat průběh všech měrných křivek (Obrázek 26) až do úplného sklopení klapky. Důvod je ten, že dolní voda rychle stoupá a dochází k nedokonalému přepadu a následně se hladiny horní a dolní vody vyrovnají. Navíc součinitel zatopení σ_z , kterým je nedokonalý přeliv zahrnut do výpočtu, se při vyšších hodnotách poměru zatopení výrazně snižuje a není dostatečně přesný. Řešením by bylo řešit proudění vody v korytě nad a pod jezem pomocí modelování ve specializovaném softwaru.



Obrázek 26: Měrná křivka výsledné vybrané varianty klapkového jezu

5.3.2 Segmentový uzávěr

Výpočet měrné křivky zdvižného segmentu s nasazenou klapkou byl rozdělen do 4 případů podle manipulace:

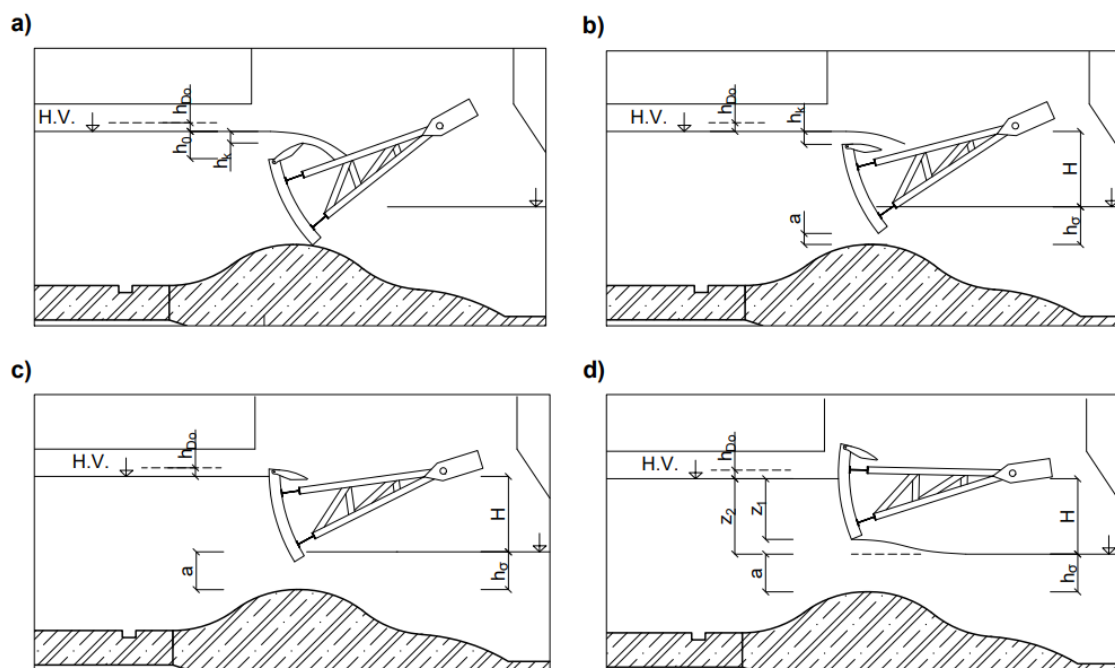
- Voda se přelévá pouze přes klapku. Výpočet proveden dle vztahu 5.4, součinitel M_h vypočítán dle rovnice 5.2 a grafu (Obrázek 25).
- Voda se převádí přes klapku a pod segmentem. Otvor je zatopen dolní vodou (vztah 5.5).
- Voda se převádí pod segmentem a zatopeným otvorem.

- d) Voda se převádí pod segmentem, otvor je rozdělen na zatopenou a nezatopenou část (vztah 5.6).

Schémat jednotlivých případů jsou uvedena na obrázku níže (Obrázek 27). Výtokový součinitel je počítán dle grafu (Obrázek 28) v závislosti na poměru hrazené výšky a výšky otvoru pod segmentem a úhlu segmentu.

Měrná křivka segmentu bez nasazené klapky je zpracována obdobně s tím rozdílem, že jsou vynechány případy a) a b).

- Případ a) $Q_a = Q_{kl}$
 Případ b) $Q_b = Q_{kl} + Q_{zo}$
 Případ c) $Q_c = Q_{zo}$
 Případ d) $Q_d = Q_{zo} + Q_o$



Obrázek 27: Schéma výpočtu měrné křivky segmentu s nasazenou klapkou

Přepadová rovnice přes klapku:

$$Q_{kl} = M_h b_u (h + h_{D0})^{3/2} \quad (5.4)$$

Výtok zatopený otvorem:

$$Q_{zo} = \mu_v a b_u \sqrt{2g(H + h_{D0})} \quad (5.5)$$

Volný výtok otvorem:

$$Q_o = \frac{2}{3} \mu_v b_u \sqrt{2g} [(z_2 + h_{D0})^{3/2} - (z_1 + h_{D0})^{3/2}] \quad (5.6)$$

Kde: Q – průtok [m^3/s]

μ_v – výtokový součinitel [–]

a – výška zatopeného otvoru pod segmentem [m]

b_u – účinná šířka pole [m]

h – přepadová výška jiná než návrhová [m]

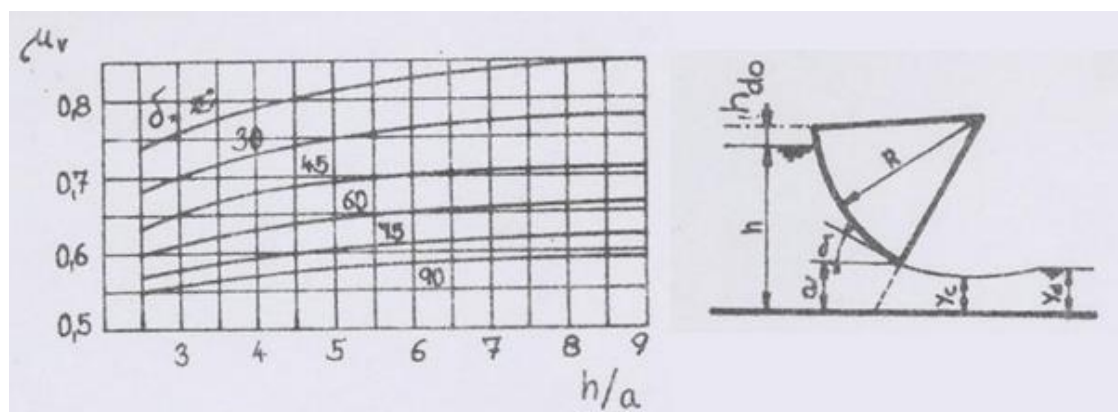
h_0 – návrhová přepadová výška [m]

g – tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

z_1 – výška od horního okraje otvoru k horní vodě [m]

z_2 – výška od spodního okraje otvoru k horní vodě [m]

h_{D0} – rychlostní výška [m]

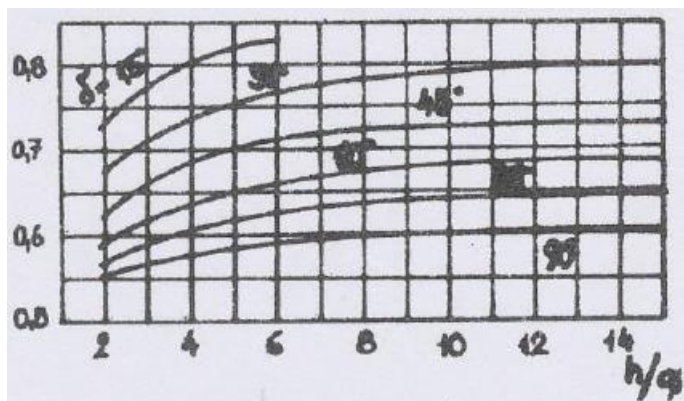


Obrázek 28: Hodnoty μ_v pro výtok pod segmentem [39]

5.3.3 Stavidlový uzávěr

Výtok pod stavidlem je počítán podobně jako výtok pod zdvižným segmentem (viz kapitola 5.3.2.). Výtokový součinitel je počítán dle grafu (Obrázek 29) v závislosti na poměr hrazené výšky a výšky otvoru pod segmentem. V tomto případě se do výpočtu používá křivka $\delta = 90^\circ$.

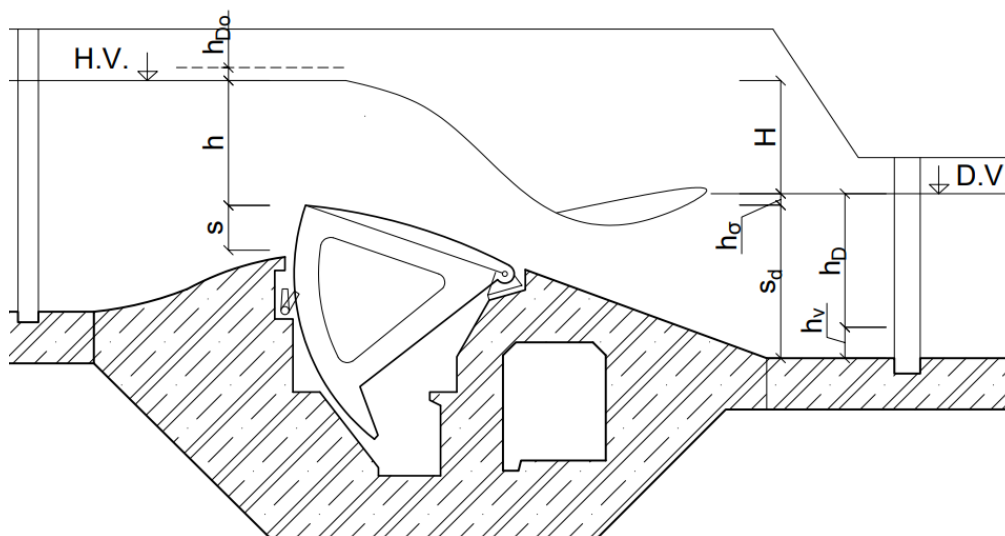
Výpočet stavidlového uzávěru s nasazenou klapkou je rovněž analogický případ jako segmentový uzávěr s nasazenou klapkou.



Obrázek 29: Hodnoty μ_v pro výtok pod segmentem [39]

5.3.4 Sektorový uzávěr

Kapacita sektorového uzávěru byla spočítána pomocí vztahu 5.7. Pro výpočet přepadového součinitele byl použit Bazinův součinitel pro ostrohranný přeliv (rovnice 5.8). Dále byl použit součinitel zatopení (Tabulka 18) a opravný součinitel sklonu (Tabulka 19).



Obrázek 30: Schéma pro přeliv přes sektorový uzávěr

Přepadová rovnice:

$$Q = \sigma_z \sigma_{sk} m b_u \sqrt{2g} (h + h_{D0})^{3/2} \quad (5.7)$$

Bazinův součinitel pro ostrohranný přepad:

$$m = \left(0.405 + \frac{0.003}{h} \right) \cdot \left[1 + 0.55 \cdot \left(\frac{h}{h+s} \right)^2 \right] \quad (5.8)$$

Kde: Q – průtok [m^3/s]

σ_z – součinitel zatopení [–]

- σ_{sk} – opravný součinitel sklonu [–]
 m – součinitel přepadu [–]
 b_u – účinná přepadová šířka [m]
 g – tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
 h – přepadová výška [m]
 h_{Do} – rychlostní výška [m]
 s – výška hrany přelivu [m]

Tabulka 19: Opravný součinitel sklonu σ_{sk} pro přelivnou stěnu skloněnou o úhel δ [39]

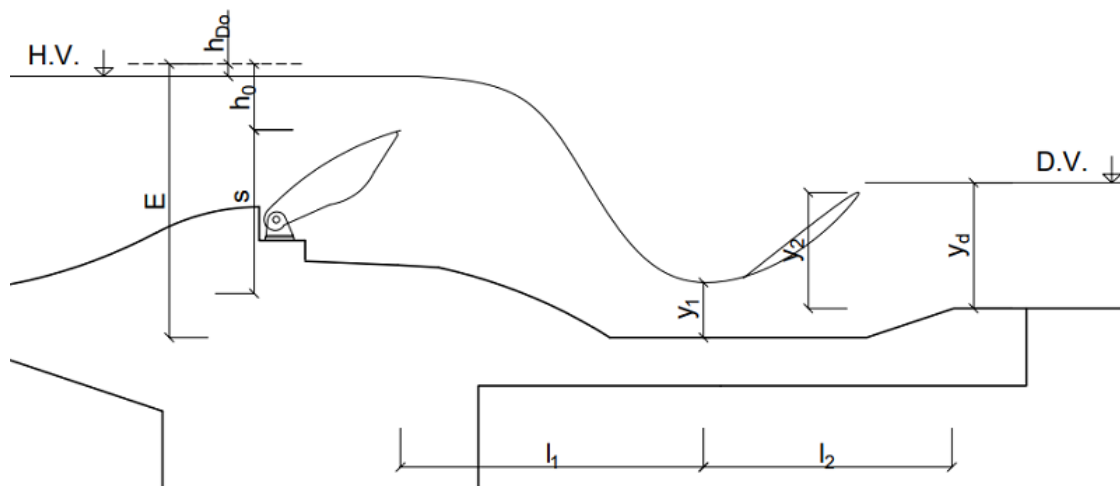
δ	45°	57°	71°30'	90°	108°30'	123°	135°
σ_{sk}	1.115	1.086	1.045	1.000	0.958	0.935	0.925

5.4 Návrh a posouzení vývaru

Vývar je konstrukční prvek pod jezem, který slouží k utlumení kinetické energie vody vznikající přepadem přes jez. Přepadem vzniká bystrinné proudění, které pod jezem ihned přechází do říčního proudění, což je doprovázeno vodním skokem.

Vývar se navrhuje na základě hodnoty míry vzduť přilehlého vodního skoku v nejnepríznivějším stavu, který může nastat. Její doporučená hodnota je $\sigma = 1,05-1,10$ a je spočtena dle vztahu 5.11. Ve vztahu figuruje hloubka dolní vody, hloubka vývaru a druhá vzájemná hloubka, která se spočítá iterací dle vztahů 5.9 a 5.10.

Délka vývaru se skládá z délky dopadu paprsku (vztah 5.12) a aktivní délky vývaru (vztah 5.13). Součinitel aktivní délky K je určován na základě poměru první a druhé vzájemné hloubky. Jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 20). Pro poměr vzájemných hloubek menší než 3, bylo uvažováno $K = 6$ (dle vztahu pana profesora Smetany). Způsob výpočtu je znázorněn na schématu (Obrázek 31).



Obrázek 31: Schéma posouzení vývaru u klapkového jezu

První vzájemná hloubka:

$$y_1 = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g \cdot (E - y_1)}} \quad (5.9)$$

Druhá vzájemná hloubka:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{0,81 \cdot q^2}{y_1^3}} \right] \quad (5.10)$$

Míra vzduť přilehlého vodního skoku:

$$\sigma = \frac{y_d + d}{y_2} \quad (5.11)$$

Délka dopadu paprsku – ostrohranný přeliv:

$$l_1 = 0,3h_0 + 1,63 \sqrt{h_0(s + 0,335h_0)} \quad (5.12)$$

Aktivní délka vodního skoku:

$$l_2 = K(y_2 - y_1) \quad (5.13)$$

Kde:

- y_1 – první vzájemná hloubka [m]
- q – měrný průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]
- φ – rychlostní součinitel, uvažováno 1,0 [–]
- g – tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
- E – výška čáry energie [m]
- y_2 – druhá vzájemná hloubka [m]
- σ – míra vzduť přilehlého vodního skoku [–]
- y_d – hloubka dolní vody pod jezem [m]
- d – hloubka vývaru [m]
- l_1 – délka doskoku vodního paprsku [m]
- h_0 – výška přepadajícího paprsku [m]
- s – výška hrany přelivu [m]
- l_2 – aktivní délka vývaru [m]
- K – součinitel aktivní délky vývaru [–]

Tabulka 20: Součinitel K v závislosti na poměr y_2/y_1 [28]

y_2/y_1	3 až 4	4 až 6	6 až 20	> 20
K	5,5	5,0	4,5	4,0

Pro návrh vývaru byly prověřeny všechny možné manipulace s jezovými uzávěry, tak aby byla vybrána nejkritičtější varianta, co se týče, jak potřebné hloubky vývaru, tak i jeho délky. Jako nejnepríznivější stav se ukázal ten, kdy dojde ke sklápění pouze jedné dělené klapky, přičemž zbylé klapky jsou plně vztyčeny. Jedná se o výjimečnou manipulaci, která může nastat např. při cíleném převádění splavenin.

Hladina dolní vody při posuzování byla uvažována podle měrné křivky, bez vlivu zdrže Modřany, tak aby byl vystižen opravdu ten nejnepríznivější stav. Byl prověřen i stav se započítáním stálé hladiny zdrže Modřany, ale výsledné rozměry vývaru to nijak neovlivnilo.

Hloubka vývaru, která by vyhověla zmíněnému nejnepríznivější stavu, byla spočtena na 1,3 m (Tabulka 21) a délka vývaru by odpovídala 18,5 m. Při jakékoliv jiné manipulaci s uzávěry by vycházela teoretická potřebná hloubka vývaru v rozmezí 0–30 cm. Na základě toho byla shledána hloubka vývaru 1,3 m jako neekonomická.

Proto byla navržena kompromisní varianta, která spočívá v osazení vývaru prahovými rozražeči. Ty umožní stabilizovat vodní skok ve vývaru i v případě, že míra vzduť σ je menší než 1,0 [28]. Díky tomu se podařilo snížit navrženou hloubku vývaru na 0,8 m. Prahové rozražeče také minimalizují vznik výmolů za prahem.

Posouzení hloubky vývaru bylo prověřeno pro různé průtoky v intervalech po 25 m³/s (Tabulka 22). Obdobně byla navržena jeho délka (Tabulka 23), která byla stanovena na 16,8 m (doskok vodního paprsku l_1 se uskuteční z velké části ještě v rámci Jamborova prahu, pro délku vývaru je rozhodující délka l_2).

V poslední tabulce (Tabulka 24) je navržený vývar posouzen na druhou nejnepríznivější variantu, která nastane při manipulaci se dvěma dělenými klapkami zároveň. Míra vzduť σ při tomto stavu dalece převyšuje doporučenou hodnotu (1,05 – 1,10).

Tabulka 21: Posouzení hloubky vývaru ($d = 1,3$ m) bez prahových rozražečů při manipulaci s jednou klapkou

Q	q	E	y_1	y_2	y_d	σ
[m ³ /s]	[m ³ /s/m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
25	1.667	6.10	0.155	1.83	1.20	1.36
50	3.333	6.11	0.313	2.53	1.69	1.18
75	5.000	6.11	0.475	3.03	2.09	1.12
100	6.667	6.12	0.643	3.42	2.45	1.10
125	8.333	6.14	0.815	3.75	2.70	1.07
139	9.267	6.15	0.914	3.90	2.85	1.06

Tabulka 22: Posouzení hloubky vývaru ($d = 0,8$ m) s prahovými rozražeči při manipulaci s jednou klapkou

Q	q	E	y_1	y_2	y_d	σ
[m ³ /s]	[m ³ /s/m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
25	1.667	5.60	0.161	1.79	1.20	1.12
50	3.333	5.61	0.327	2.46	1.69	1.01
75	5.000	5.61	0.498	2.94	2.09	0.98
100	6.667	5.62	0.674	3.32	2.45	0.98
125	8.333	5.64	0.861	3.61	2.70	0.97
139	9.267	5.65	0.967	3.76	2.85	0.97

Tabulka 23: Posouzení délky vývaru ($d = 0,8$ m) s prahovými rozražeči při manipulaci s jednou klapkou

Q	h_0	s	L_1	y_2/y_1	K	L_2
[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]
25	2.68	1.82	5.20	11.08	4.50	7.31
50	1.50	3.00	4.19	7.52	4.50	9.59
75	1.90	2.60	4.61	5.90	5.00	12.21
100	2.25	2.25	4.91	4.92	5.00	13.21
125	2.55	1.95	5.12	4.20	5.00	13.75
139	2.70	1.80	5.21	3.89	5.50	15.35

Tabulka 24: Posouzení hloubky vývaru ($d = 0,8$ m) s prahových rozražeči při manipulaci se dvěma klapkami

Q	q	E	y_1	y_2	y_d	σ
[m ³ /s]	[m ³ /s/m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
25	0.833	5.60	0.080	1.29	2.60	2.65
50	1.667	5.61	0.161	1.79	2.60	1.90
75	2.500	5.61	0.244	2.16	2.60	1.58
100	3.333	5.62	0.327	2.46	2.60	1.38
125	4.167	5.64	0.411	2.72	2.70	1.29
150	5.000	5.66	0.497	2.94	2.96	1.28
175	5.833	5.68	0.584	3.14	3.28	1.30
200	6.667	5.70	0.671	3.33	3.52	1.30
225	7.500	5.72	0.760	3.49	3.75	1.30
250	8.333	5.75	0.850	3.64	3.98	1.31

5.4.1.1 Vývar závěr

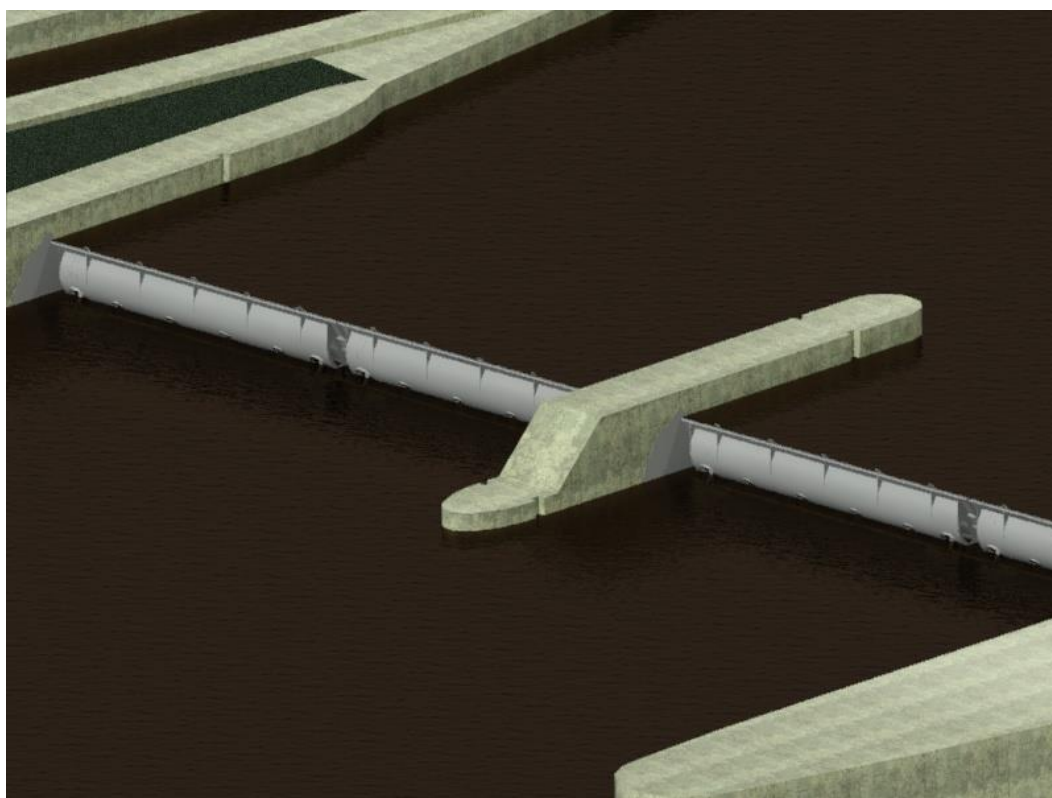
Výsledná navržená hloubka vývaru je 0,80 m a délka 16,80 m. Vývar je opatřen prahovými rozražeči o výšce 0,80 m a šířce 1 m. Rozstup mezi jednotlivými rozražeči je 1,5 m. Vývar je ukončen vývarovým prahem ve sklonu 1:3. Za vývarem je zához z těžkého kamene o délce 6,5 m.

6. Návrh a posouzení stavebních částí

6.1 Popis navržené konstrukce

Konstrukce jezu je betonová a je rozdělena na dilatační celky. Hlavní dilatační celky jsou: jezová část, vývarová deska a pilíře. Jezová část a vývarová deska je navíc rozdělena po šířce cca 15 m na zvláštní dilatační bloky. Dilatační spáry jsou těsněny pryžovými pásky.

Na snímku (Obrázek 32) je zobrazena vizualizace navrženého jezu.



Obrázek 32: Vizualizace navrženého jezu

6.1.1 Jezová část

Jezová část se skládá ze dvou jezových polí o světlosti 30 m. Každé pole je hrazeno dvěma klapkami o šířce 15 m a hrazené výšce 2,7 m. Klapka je ovládaná podpíranými hydromotory.

Spodní stavba je tvořena Jamborovým prahem o výšce 1,8 m. Základová spára je v hloubce 6 m pod původním terénem. V základové spáře je vybudován ozub. Tvar a hloubka založení jsou převzaty z předprojektové přípravy [14]. Takto hluboké založení

snižuje průsaky a zvyšuje stabilitu konstrukce. V jezovém tělese je vedena revizní chodba, ze které je přístup do komor s hydromotory a na vrchol pilíře.

Mezi Jamborovým prahem a deskou před ním je vytvořena pracovní spára. Obě části budou provázány výztuží, tím bude zajištěno spolupůsobení. Deska před Jamborovým prahem je 1 m silná a 6 m dlouhá. V desce je zřízena drážka pro provizorní hrazení.

6.1.2 Vývarová deska

Vývarová deska je dlouhá 18,8 m a 2 m silná. Vývarová deska je zakončena prahem se sklonem 1:3. Základová spára je rovná, na konci vývarové desky je zalomena a zahloubena o 1,2 m. Část vývarové desky přesahuje pod zához za prahem, které jej přitěžuje. Tento tvar zlepšuje statické vlastnosti vývarové desky.

Pro snížení vztlaků jsou na vývarové desce umístěny drenážní otvory o průměrech 0,3 m. Ty jsou umístěny šachovnicově po celé vývarové desce s osovou vzdáleností 3 m. Drenážní otvory jsou vyplněny kamenivem frakce 5-20 mm a kryté kovovou mřížkou. Z druhé strany je drenáž chráněna dvěma filtry s frakcí 1-5 mm a 0,25-1 mm.

Ve vývarové desce je navržena drážka pro provizorní hrazení.

6.1.3 Pilíře

6.1.3.1 Návodní pilíř

Délka návodního pilíře je 26,25 m a šířka 3 m. Výška pilíře nad základovou spárou je 7,5 m. Vrchol pilíře je převýšen o 1 m nad nominální hladinou zdrže. V zadní části je pilíř snížen o 2,5 m,

Přední zhlaví je půlkruhově zaobleno, zadní zhlaví má proudnicový tvar (viz kapitola 5.2). V prostřední části pilíře jsou vloženy rovinné úseky kvůli jezovému uzávěru a provizornímu hrazení. V pilíři jsou drážky pro provizorní hrazení.

V návodním pilíři je zřízena komunikační šachta, která propojuje revizní štolu a vršek pilíře. V pilíři je vedeno zavzdušňovací potrubí o průměru 300 mm.

6.1.3.2 Střední dělicí pilíř

Střední dělicí pilíř odděluje levé jezové pole od malé vodní elektrárny. Jeho tvar bude upraven tak, aby umožňoval optimální nátok na vodní elektrárnu (není předmětem bakalářské práce).

6.2 Posouzení stability spodní stavby

Stabilita spodní stavby byla posouzena na posun v základové spáře (rovnice 6.1 a 6.2), na překlopení (rovnice 6.3) a na zdvih konstrukce vztlakem (rovnice 6.4 a 6.5).

Hodnota totálního součinitele smykového tření betonu s podložím byla odečtena z tabulek $\mu_{tot} = 0,5$ (zvoleno s ohledem na součinitele smykového tření šterkopisku (0,55-0,6) a břidlice (0,3-0,5), která tvoří skalní podloží.

Posouzení bylo prováděno na běžný metr konstrukce.

Stabilita proti posunutí v základové spáře:

$$\gamma_n F_{ud} \leq \gamma_{stp} U_u \quad (6.1)$$

Kde: γ_n – součinitel účelu (třída objektu Ib = 1,1) [–] [28]

F_{ud} – výslednice sil působící rovnoběžně se spárou
v uvažovaném směru [kN]

γ_{stp} – součinitel stability polohy = 0,9 [–]

U_u – odpor proti posunutí [kN]

Výpočtový odpor proti posunutí:

$$U_u = \mu_{tot} \cdot N_d + c_{tot} \cdot A_c \quad (6.2)$$

Kde: μ_{tot} – totální hodnota součinitele smykového tření [–]

N_d – svislá složka výslednice všech sil

c_{tot} – totální hodnota soudržnosti zemin [kPa]

A_c – plocha základové spáry, na níž působí síly od soudržnosti

Podmínka proti překlpení:

$$\gamma_n \cdot M_{act} \leq \gamma_{stp} \cdot M_{pas} \quad (6.3)$$

Kde: M_{act} – aktivní moment sil [kNm]

γ_{stp} – součinitel stability polohy = 1,0 [–]

γ_n – součinitel účelu (třída objektu Ib = 1,1) [–]

M_{pas} – pasivní moment sil [kNm]

Posouzení proti zdvihu konstrukce vztlakem:

$$\gamma_n \cdot F_{vd} \leq \gamma_{stp} \cdot U_v \quad (6.4)$$

Výpočtová výslednice sil od zatížení vztlakem:

$$F_{vd} = \gamma_{fv} \cdot F_v \quad (6.5)$$

Kde: F_{vd} – výpočtová výslednice sil od zatížení vztlakem [kN]
 γ_{stp} – součinitel stability polohy = 1,0 [–]
 γ_n – součinitel účelu (třída objektu Ib = 1,1) [–]
 U_v – výpočtový odpor proti nadzvednutí [kN]
 γ_{fv} – součinitel zatížení vztlakem [–]
 F_v – výslednice sil od zatížení vztlakem [kN]

6.2.1 Síly působící na konstrukci

Do výpočtů byly zahrnuty hydrostatické síly, vlastní tíha konstrukce, vztlakové síly a síly od zvodnělé zeminy.

6.2.1.1 Vlastní tíha konstrukce

Konstrukce je tvořena převážně prostým betonem s konstrukční výztuží, proto je objemová tíha uvažována $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$.

6.2.1.2 Tlak vody

Na konstrukci působí hydrostatický tlak vody a vztlak způsobený vodou v podloží, která nadlehčuje konstrukci. Měrná tíha vody je uvažována $\gamma_v = 10 \text{ kN/m}^3$.

Vztlakové síly jsou vypočítány dle Laneho řešení (vztah 6.6). Laneho řešení vztlaku předpokládá lineární pokles tlaku po celém rozvinutém obrysu spodní stavby. Do výpočtu jsou zahrnuty rozdílné koeficienty hydraulické vodivosti v různých směrech. Větší součinitel hydraulické vodivosti se předpokládá ve vodorovném směru, proto je ve výpočtu počítána třetinová délka vodorovných částí. Za vodorovné části se považují konstrukce s úhlem menší než 45° (včetně).

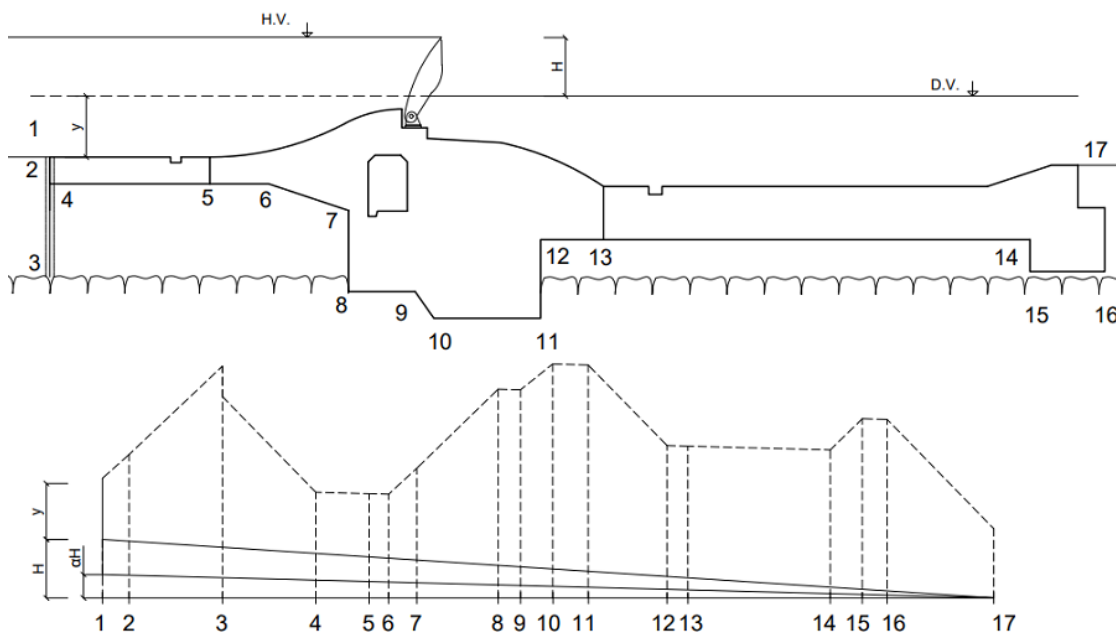
Vlivem opatření proti vztlaku je vodní přetlak (H) snížen o koeficient α . Hodnota koeficientu je ve výpočtech uvažován na $\alpha = 0,4$. Tlak snižuje zejména drenáž ve vývarové desce a také fakt, že konstrukce zasahuje do podloží, které je méně propustné.

Na obrázku níže (Obrázek 33) je znázorněno Laneho řešení vztlaku při běžném stavu.

Laneho řešení vztlaku:

$$L = \sum L_v + \frac{1}{3} \sum L_h \quad (6.6)$$

Kde: L_v – svislé délky obrysu jezu
 L_h – horizontální délky obrysu jezu



Obrázek 33: Laneho řešení vztlaku při běžném stavu

6.2.1.3 Zemní tlak

Zemní tlak se rozděluje na aktivní a pasivní. Aktivní zemní tlak se používá pro případy, kdy na konstrukci působí zemní tlak a síly by s konstrukcí posunuly. Pasivní zemní tlak se naopak používá pro odpor zeminy, který vyvine při vtlačování konstrukce do zeminy.

Objemová tíha zvodnělé zeminy je ve výpočtech uvažována $\gamma_v = 12 \text{ kN/m}^3$. Totální úhel vnitřního tření pro zeminu v lokalitě je dle tabulek [28] $\varphi = 32^\circ$.

Výslednice zemního tlaku se spočítají podle rovnic 6.7 a 6.9. Výpočet součinitelů aktivního a pasivního zemního tlaku pro nesoudržné zeminy popisují vztahy 6.8 a 6.10. Po dosazení do rovnic vyjde součinitel aktivního zemního tlaku $K_a = 0,307$ a součinitel pasivního zemního tlaku $K_p = 3,255$.

Konstrukce spodní stavby zasahuje v hlavní části do předpokládaného skalního podloží. Přesná hloubka a stav skalního podloží není zřejmý, proto není ve stabilitních výpočtech uvažováno, což je na straně bezpečnosti.

Výslednice aktivního bočního zemního tlaku:

$$S_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{vz} h^2 k_a \quad (6.7)$$

Součinitel aktivního bočního zemního tlaku:

$$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6.8)$$

Výslednice pasivního bočního zemní tlaku:

$$S_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{vz} h^2 k_p \quad (6.9)$$

Součinitel aktivního bočního zemního tlaku:

$$k_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6.10)$$

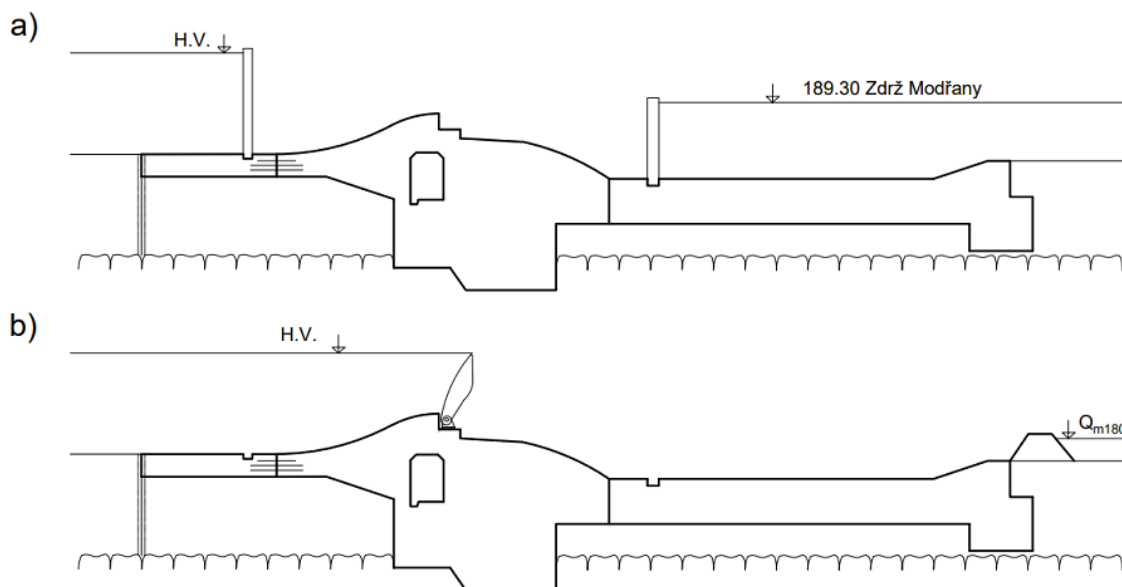
Kde: γ_{vz} – objemová hmotnost zeminy [kN/m³]
 h – výška vrstvy zeminy [m]
 φ – totální úhel vnitřního tření [°]

6.2.2 Zatěžovací stavy

Dilatační bloky konstrukce byly posouzeny na nejnepříznivější stavy. Byly vyhodnoceny dva nejkritičtější stavy (Obrázek 34):

a) Revize uzávěru – hladina horní a dolní vody jsou na běžné úrovni. Prostor kolem jezového uzávěru je zahrazen a voda vyčerpána. Vlastní váha uzávěru nepřitěžuje konstrukci.

b) Revize vývaru – za prahem vývaru je vybudována jímka a voda ve vývaru je odčerpána. Hladina horní vody je na běžné úrovni, hladina dolní hladiny je snížena na kótu 187,55 m n.m., což odpovídá hladině Q₁₈₀.



Obrázek 34: Schéma zatěžovacích stavů a) a b)

6.2.3 Jezové těleso

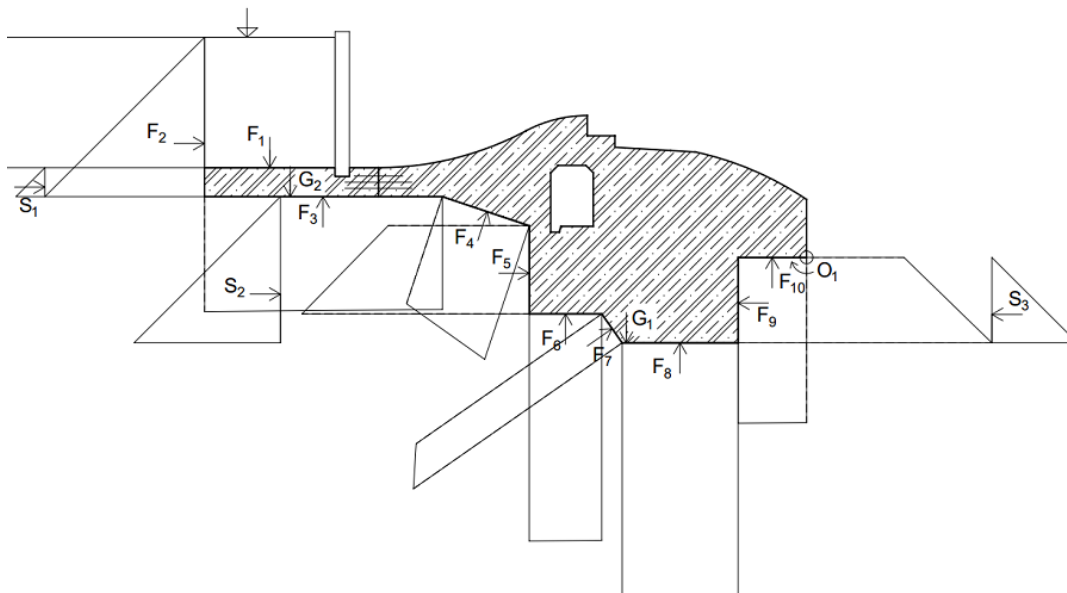
Jezové těleso je výrazně v méně příznivém stavu při zatěžovacím stavu a). Při zatěžovacím stavu b) konstrukce bez problémů vyhoví všem podmínkám stability. Níže je uveden postup výpočtu pro zatěžovací stav a).

Překlopení konstrukce bylo posouzeno k bodu otáčení O_1 , který je vyznačen na schématu (Obrázek 35). Na schématu jsou také vyznačeny síly působící na konstrukci. Síly jsou pak vyčísleny v tabulce (Tabulka 25). V tabulce jsou uvedeny obsahy zatěžovacích obrazců k jednotlivým silám a také velikost jejich ramen k bodu otáčení O_1 .

Tabulka 25: Síly působící na vývarovou desku při zatěžovacím stavu a) a jejich ramena k bodům otáčení

Síla	A [m ²]	kN/m ³	[kN]	r(O_1) [m]
F ₁	20.24	10	202.44	18.51
F ₂	15.13	10	151.25	3.93
F ₃	32.24	10	322.42	16.67
F _{4y}	4.39	10	43.88	1.61
F _{4z}	13.14	10	131.45	11.00
F ₅	19.37	10	193.68	0.51
F ₆	19.57	10	195.65	8.31
F _{7y}	8.30	10	82.99	2.43
F _{7z}	5.81	10	58.09	6.70
F ₈	35.06	10	350.62	4.36
F ₉	21.34	10	213.41	1.54
F ₁₀	13.46	10	134.61	1.18
G ₁ *	58.33	23	1341.57	6.21
G ₂	5.86	23	134.73	17.80
S _{1a}	0.15	12	1.84	2.43
S _{1p}	1.63	12	19.53	2.43
S _{2a}	3.92	12	47.02	1.27
S _{2p}	41.50	12	498.00	1.27
S _{3a}	1.34	12	16.04	1.97
S _{3p}	14.16	10	169.94	1.97

*Komory pro hydromotory byly do výpočtu zahrnuty tak, že jejich objem byl rozpočítán po celé délce dilatačního bloku.



Obrázek 35: Schéma sil působící na jezovou část při zatěžovacím stavu a)

Posunutí v základové spáře:

$$F_{ud} = F_2 + F_{4y} + F_5 + F_{7y} - F_9 + S_{1a} + S_{2a} - S_{3p} = 137,32 \text{ kN}$$

$$N_d = G_1 + G_2 + F_1 - F_3 - F_{4z} - F_6 - F_{7z} - F_8 - F_{10} = 485,91 \text{ kN}$$

$$U_u = \mu_{tot} \cdot N_d = 0,5 \cdot 485,91 = 242,95 \text{ kN}$$

$$1,1 \cdot 137,32 \leq 0,9 \cdot 245,95$$

$$151,05 \text{ kN} \leq 218,66 \text{ kN} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Překlopení k bodu O₁:

$$M_{akt} = F_2 \cdot r_{F2} + F_3 \cdot r_{F3} + F_{4y} \cdot r_{F4y} + F_{4z} \cdot r_{F4z} + F_6 \cdot r_{F6} + F_{7z} \cdot r_{F7z} + F_8 \cdot r_{F8} + F_9 \cdot r_{F9} \\ + F_{10} \cdot r_{F10} + S_{1a} \cdot r_{S1a} + S_{3a} \cdot r_{S3a} = 11\,553,4 \text{ kNm}$$

$$M_{pas} = F_5 \cdot r_{F5} + F_{7y} \cdot r_{F7y} + G_1 \cdot r_{G1} + G_2 \cdot r_{G2} + S_{2p} \cdot r_{S2p} = 15\,412,6 \text{ kNm}$$

$$1,1 \cdot 11\,553,4 \leq 1,0 \cdot 15\,412,6$$

$$12\,708,7 \text{ kNm} \leq 15\,412,6 \text{ kNm} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Zdvih konstrukce vztlakem:

$$F_v = F_3 + F_{4z} + F_6 + F_{7z} + F_8 + F_{10} = 1\,192,84 \text{ kN}$$

$$F_{vd} = 1\,192,84 \cdot 1,1 = 1\,312,12 \text{ kN}$$

$$U_v = G_1 + G_2 + F_1 = 1\,678,74 \text{ kN}$$

$$1,1 \cdot 1\,312,12 \leq 1,0 \cdot 1\,678,74$$

$$1\,443,33\text{ kNm} \leq 1\,678,74\text{ kNm} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Navržená konstrukce vyhovuje všem posuzovaným podmínkám stability.

6.2.4 Vývarová deska

Vývarová deska byla posouzena na posun v základové spáře a na překlopení při zatěžovacím stavu a) a b). Při zatěžovacím stavu za b) byla konstrukce navíc posouzena na zdvih.

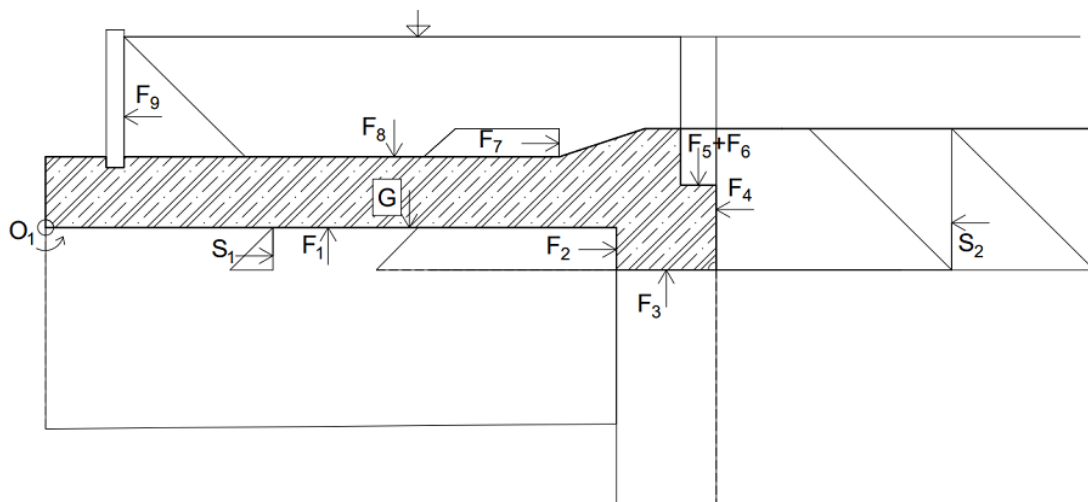
6.2.4.1 Zatěžovací stav a)

Při zatěžovacím stavu za a) je do vývarové desky vnášena vodorovná síla z provizorního hrazení. V tomto stavu hrozí zejména posunutí vývarové desky směrem k jezové části. Konstrukce při zatěžovacím stavu a) není výrazněji ohrožena zdvihem, protože je zatěžována dolní vodou, proto tu nebude uvedeno posouzení na zdvih.

Síly působící na konstrukci jsou znázorněny na schématu (Obrázek 36) a jejich velikost je uvedena v tabulce (Tabulka 26)

Tabulka 26: Síly působící na vývarovou desku a jejich ramena k bodů otáčení při zatěžovacím stavu a)

Síla	A [m ²]	kN/m ³	[kN]	r(O ₁) [m]
F ₁	90.07	10	900.70	7.92
F ₂	7.37	10	73.72	0.62
F ₃	18.80	10	188.03	17.40
F ₄	18.40	10	184.01	0.51
F ₅	5.00	10	50.00	18.30
F ₆	1.60	12	19.20	18.30
F ₇	2.68	10	26.82	2.38
F ₈	51.27	10	512.68	9.78
F ₉	5.78	10	57.80	3.13
G	41.78	23	960.88	10.20
S _{1p}	2.34	12	28.12	0.80
S _{1a}	0.22	12	2.65	0.80
S _{2p}	26.04	12	312.44	0.13
S _{2a}	2.46	12	29.50	0.13



Obrázek 36: Schéma sil působící na vývarovou desku při zatěžovacím stavu a)

Posunutí v základové spáře:

$$F_{ud} = -F_2 + F_4 - S_{1p} + S_{2a} - F_7 + F_9 = 142,65 \text{ kN}$$

$$N_d = G - F_1 - F_3 + F_5 + F_6 + F_8 = 454,03 \text{ kN}$$

$$U_u = \mu_{tot} \cdot N_d = 0,5 \cdot 177,81 = 227,02 \text{ kN}$$

$$1,1 \cdot 142,65 \leq 0,9 \cdot 227,02$$

$$156,91 \text{ kN} \leq 204,31 \text{ kN} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Překlopení k bodu O₁:

$$M_{akt} = F_1 \cdot r_{F1} + F_2 \cdot r_{F2} + F_3 \cdot r_{F3} + F_4 \cdot r_{F4} + F_9 \cdot r_{F9} + S_{1a} \cdot r_{S1a} + S_{2p} \cdot r_{S2a} \\ = 10\,735,0 \text{ kNm}$$

$$M_{pas} = F_5 \cdot r_{F5} + F_6 \cdot r_{F6} + F_7 \cdot r_{F7} + F_8 \cdot r_{F8} + G \cdot r_{O1G} = 16\,138,9 \text{ kNm}$$

$$1,1 \cdot 10\,735,0 \leq 1,0 \cdot 16\,138,9$$

$$10\,735,0 \text{ kNm} \leq 16\,138,9 \text{ kNm} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Navržená konstrukce vyhovuje všem posuzovaným podmínkám stability

6.2.4.2 Zatěžovací stav b)

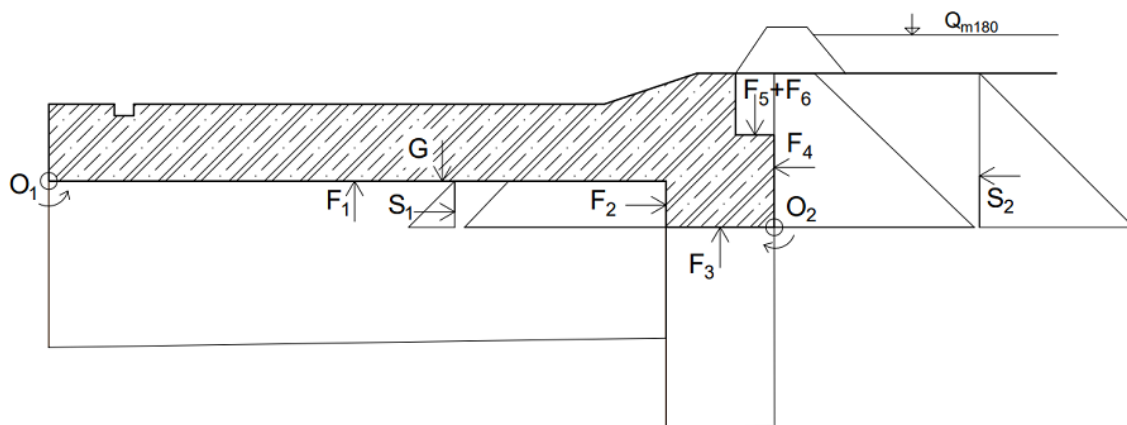
Vývarová deska není v tomto stavu přitěžovaná vodou ve vývaru, proto hrozí její pootočení, popřípadě posunutí k jezovému tělesu.

Překlopení vývarové desky bylo posouzeno k bodům O₁ a O₂, které jsou společně se silami vyznačeny na schématu (Obrázek 37). U bodů otáčení je vyznačen kladný směr M_{akt}. Ve schématu jsou vyznačeny zatěžovací obrazce na základě, kterých jsou spočteny

jednotlivé výslednice sil. V tabulce (Tabulka 27) jsou uvedeny obsahy zatěžovacích obrazců, výsledné síly a ramena jednotlivých sil k bodům otáčení O_1 a O_2 .

Tabulka 27: Síly působící na vývarovou desku a jejich ramena k bodům otáčení při zatěžovacím stavu b)

Síla	A [m ²]	kN/m ³	[kN]	r(O ₁) [m]	r(O ₂) [m]
F ₁	67.22	10	672.15	7.92	10.88
F ₂	5.58	10	55.83	0.62	0.58
F ₃	14.61	10	146.11	17.40	1.40
F ₄	12.44	10	124.36	0.36	1.56
F ₅	1.60	10	16.00	18.30	0.50
F ₆	1.60	12	19.20	18.30	0.50
G	41.78	23	960.88	10.20	8.60
S _{1p}	2.34	12	28.12	0.80	0.40
S _{1a}	0.22	12	2.65	0.80	0.40
S _{2p}	26.04	12	312.44	0.13	1.33
S _{2a}	2.46	12	29.50	0.13	1.33



Obrázek 37: Schéma sil působících na vývarovou desku při zatěžovacím stavu b)

Posunutí v základové spáře:

$$F_{ud} = F_4 - S_{1p} + S_{2a} - F_2 = 69,91 \text{ kN}$$

$$N_d = G - F_1 - F_3 + F_5 + F_6 = 177,81 \text{ kN}$$

$$U_u = \mu_{tot} \cdot N_d = 0,5 \cdot 177,81 = 88,91 \text{ kN}$$

$$1,1 \cdot 69,91 \leq 0,9 \cdot 88,91$$

$$76,90 \text{ kN} \leq 80,02 \text{ kN} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Překlopení k bodu O₁:

$$M_{akt} = F_1 \cdot r_{O1F1} + F_2 \cdot r_{O1F2} + F_3 \cdot r_{O1F3} + F_4 \cdot r_{O1F4} + S_{1a} \cdot r_{O1S1a} + S_{2p} \cdot r_{O1S2a} \\ = 7\,952,92 \text{ kNm}$$

$$M_{pas} = F_5 \cdot r_{O1F5} + F_6 \cdot r_{O1F6} + G \cdot r_{O1G} = 10\,441,20 \text{ kNm}$$

$$1,1 \cdot 7\,952,92 \leq 1,0 \cdot 10\,441,20$$

$$8\,748,21 \text{ kNm} \leq 10\,441,20 \text{ kNm} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Překlopení k bodu O₂:

$$M_{akt} = F_1 \cdot r_{O2F1} + F_2 \cdot r_{O2F2} + F_3 \cdot r_{O2F3} + S_{1a} \cdot r_{O2S1a} = 7\,548,90 \text{ kNm}$$

$$M_{pas} = F_4 \cdot r_{O2F4} + F_5 \cdot r_{O2F5} + F_6 \cdot r_{O2F6} + G \cdot r_{O2G} + S_{2p} \cdot r_{O2S2p} = 8\,895,43 \text{ kNm}$$

$$1,1 \cdot 7\,548,90 \leq 1,0 \cdot 8\,895,43$$

$$8\,303,78 \text{ kNm} \leq 8\,895,43 \text{ kNm} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Zdvih konstrukce vztlakem:

$$F_v = F_1 + F_3 = 818,27 \text{ kN}$$

$$F_{vd} = 818,27 \cdot 1,1 = 900,09 \text{ kN}$$

$$U_v = G + F_5 + F_6 = 996,08 \text{ kN}$$

$$1,1 \cdot 900,09 \leq 1,0 \cdot 996,08$$

$$990,10 \text{ kN} \leq 996,08 \text{ kN} \quad \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Navržená konstrukce vyhovuje všem posuzovaným podmínkám stability

7. Závěr

Na začátku bakalářské práce bylo představeno zájmové území jezu Radotín a projekty s přímou vazbou na jez Radotín. Na základě těchto vstupní dat byl proveden výběr nejoptimálnějšího řešení jezu. Výběr výsledné varianty byl rozdělen na dvě hlavní části.

V první části byl vybrán typ jezového uzávěru. Pro tento účel bylo sestaveno 6 variant jezových uzávěrů. Výběr probíhal na základě 14 vážených kritérií. Kritéria zahrnovala, jak použitelnost uzávěru pro dané účely, tak i jeho pořizovací a provozní náklady. Následně byly jednotlivé varianty podle těchto kritérií porovnány. Nejvhodnějším uzávěrem pro jez Radotín se ukázala být podpíraná dutá klapka.

V druhé části byla řešena výška Jamborova prahu a počet jezových polí. Výška Jamborova prahu byla v porovnání s předprojektovou přípravou zvýšena o 60 cm na výšku 1,8 m. Tato změna způsobí snížení ceny stavby v rozmezí 790 000 Kč až 3,1 mil. Kč v závislosti na aktuální ceně oceli a betonu. Také bylo rozhodnuto jez uspořádat do schématu 2 jezové pole o světlosti 30 m, hrazené dvěma klapkami každé o šířce 15 m.

V další kapitole byla zvolená dutá klapka navržena. Výsledný návrh byl vymodelován ve výpočetním programu SCIA Engineer 20. To umožnilo zjistit velikost deformací uzávěru v různých polohách – plné zahrazení, sklopení o 0,6 H a úplné sklopení. Ve výpočtu byly uvažovány hydrostatické a hydrodynamické síly působící na uzávěr. Velikost největších deformací byla 14,7 mm. To nastalo při úplném sklopení klapky. Tato velikost nepředstavuje problémy v použitelnosti uzávěru. Byly také spočteny síly v ložiskách a velikost napětí v nejzatíženější diafragmě.

Na základě navrženého uzávěru byly sestaveny měrné křivky jezu při různých manipulacích. Rozsah výpočtů kapacity jezu byl omezen zvoleným způsobem výpočtu. Vhodnější by bylo ověřit výpočty pomocí 2D říčního modelu, který by také umožnil posoudit změny odtokových poměrů při povodňových stavech. Měrné křivky posloužily k návrhu vývaru. Vývar byl navržen 0,8 m hluboký a 16,8 m dlouhý. Vývar byl opatřen prahovými rozražeči.

Na závěr byla navržena spodní stavba a celá konstrukce byla posouzena na ztrátu stability při nejnepříznivější stavech. Konstrukce vyhověla všem podmínkám stability.

Navržená konstrukce byla včetně jezového uzávěru vykreslena v příložené výkresové dokumentaci. Pro lepší představu podoby návrhu byla vyhotovena vizualizace jezu. V bakalářské práci neřešené části jezu jako je plavební komora, MVE anebo rybí přechod, byly převzaty z původní předprojektové přípravy.

8. Seznam použitý zdrojů

- [1] **Google Earth** [online] [cit. 14.03.2022]. Dostupné z: <https://earth.google.com/web/>
- [2] **Lahovická Drbna**. Pravěká řeka Berounka [online] [cit. 10.03.2022]. Dostupné z: <http://www.lahovicky.cz/products/praveka-reka-berounka/>
- [3] **Povodí Vltavy**. Vodní dílo Modřany [online] [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vltavska-vodni-cesta/vodni-dilo-modrany>
- [4] **TV-ADams**. Modřanský jez [online] [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: http://tv-adams.wz.cz/jez_modrany.html
- [5] **České přístavy, a.s.** Přístav Praha Radotín [online][cit. 06.03.2022]. Dostupné z: <https://www.ceskepristavy.cz/index.php?typ=CBA&showid=68>
- [6] **Česká geologická služba**. Vrtná prozkoumanost. [online] [cit. 29.03.2022]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/
- [7] **Česká geologická služba**. Geovědní mapy 1 : 25 000. [online] [cit. 02.04.2022]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr25/>
- [8] **Sweco Hydroprojekt a.s.** Průvodní zpráva – Rekonstrukce jezu v Černošicích. 2012. [online] [cit. 02.04.2012]. Dostupné z: https://zakazky.eagri.cz/document_23407/389359d61994df57f-b-pruvodni-zprava-012940-12-1-109153901-0500-pdf
- [9] **IPR Praha**. PROJEKT SOUTOK analytické podklady [online]. Dostupné z: https://iprpraha.cz/uploads/assets/dokumenty/analyticke_podklady_soutok_2018.pdf
- [10] **ČHMÚ**. Evidenční list operativního profilu Praha - Radotín [online] [cit. 18.02.2022]. Dostupné z: <https://hydro.chmi.cz/hpps/evlist.php?seq=20949735>
- [11] **DHI a.s.** Dolní Vltava – Podklady pro optimalizace zvládnání povodňových rizik, 2015 [online] [cit. 06.03.2022]. Dostupné z: https://www.pvl.cz/files/download/planovani-v-oblasti-vod/dv-podklady-pro-optimalizaci/Zprava_Dolni_Vltava_2015.pdf
- [12] **Povodí Vltavy, statní podnik**. Souhrnná zpráva o povodni v dílčích povodích Horní Vltavy, Berounky, Dolní Vltavy a ostatních přítoků Dunaje. Povodeň červen 2013. 2014. [online] [cit. 05.04.2022]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/Z0152/um/56733468/2013-06-zprava-o-povodni-spravce-povodi.pdf>

- [13] **Hydroekologický informační systém VÚV TGM** Záplavové území [online] [cit. 24.02.2022]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=isvs_zapluz&lon=14.3809245&lat=49.9851728&scale=30240
- [14] **HYDROPROJEKT CZ a.s.** SPLAVNĚNÍ BEROUNKY V RADOTÍNĚ 2009
- [15] **FRAJER, Jindřich a KOPP Jan.** Projekt profesora Antonína Smrčka na vybudování vodní cesty Praha – Regensburg. 2015 [online] [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/288965529_PROJEKT_PROFESORA_ANTONINA_SMRCKA_NA_VYBUDOVANI_VODNI_CESTY_PRAHA_-_REGENSBURG
- [16] **KRAML Karel.** Vodní dílo Křivoklát na Berounce. 2012. [online] [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: https://kostelik.cz/wp-content/uploads/2012/03/Krivoklatska_prehrada.pdf
- [17] **Pöyry Environment a.s.** Generel splavnění řeky Berounky z Prahy do Berouna pro I. třídu. [Online] 2012. [cit. 22.01.2022]. Dostupné z: <https://adoc.pub/generel-splavn-ni-eky-berounky-z-prahy-do-berouna-pro-i-t-id.html>
- [18] **AQUATIS a.s.** Studie splavnění řeky Berounky z Prahy do Berouna pro třídu 0. [Online] 2018. [cit. 22.01.2022]. Dostupné z: <http://www.praha-karlstejn.cz/assets/images/Technicka%20zprava%20-%20MT.pdf>
- [19] **Ing. arch Zdeněk Ent, IPR Praha** Soutok? Výběr současných stavebních záměrů v území říční nivy Berounky a Vltavy [online] 12.5.2015 [cit. 18.02.2022]. Dostupné z: https://iprpraha.cz/uploads/assets/dokumenty/kvp/Soutok/5.6prezentace_konference.pdf
- [20] **ČÚZK** Základná mapa České republiky 1:10 000 [online] [cit. 18.02.2022]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>
- [21] **Česká televize.** Splavnění Berounky zničí krajinu a zhorší následky povodní, píší vládě starostové [online] [cit. 22.01.2022]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/domaci/2486005-splavneni-berounky-znici-krajinu-a-zhors-nasledky-povodni-pisi-vlade-starostove>
- [22] **G E T s. r. o.** Oznámení záměru – Stavba č. 8267 Radotín [online] [cit. 06.03.2022]. Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX1BIQTI1N19vem5hbWVuaURPQ18xLnBkZg/PHA256_oznameni.pdf
- [23] **Praha.eu.** Ověřovací studie Radotínská jezera, 2009 [online] [cit. 06.03.2022]. Dostupné z: https://www.praha.eu/public/da/c2/9f/1559203_363963_radotinska_jezera_urbanisticky_navrh.pdf
- [24] **Městská část Praha 16.** Alternativní studie Radotínských jezer. [online] [cit. 25.03.2022]. Dostupné z: <https://www.mcpraha16.cz/file/2Ya1/Radotin-Jezera-C4.pdf>

- [25] **Městská část Praha 16.** Sportovně rekreační areál Radotín [online] [cit. 25.03.2022]. Dostupné z: <https://m.praha16.eu/file/zHd1/Komplexni-urbanisticko-krajinarsky-navrh-celkovy-stav.pdf>
- [26] **IPR PRAHA.** Soutok [online] [cit. 28.04.2022]. Dostupné z: <https://iprpraha.cz/projekt/9/soutok>
- [27] **GABRIEL P., GRANDTNER T., PRŮCHA M., VÝBORA P.:** *Jezy*. Praha: SNTL 1989.
- [28] **MEDŘICKÝ, Vladimír a Petr VALENTA.:** *Hydrotechnické stavby 1: navrhování jezů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04309-7
- [29] **Valenta, Petr.** Přednášky předmětu 142JVCE, FSV ČVUT. Zimní semestr 2020-2021.
- [30] **Ústav územního rozvoje.** Průměrné ceny dopravní a technické infrastruktury obcí – Aktualizace 2021. Ministerstvo pro místní rozvoj ČR [online], 2021. Dostupné z: <http://www.uur.cz/images/5-publikacni-cinnost-a-knihovna/internetove-prezentace/prumerne-ceny-TI/2021/ceny-ti-2021-celek.pdf>
- [31] **HYDROPROJEKT PRAHA.** Navrhování a výpočet klapkových hradicích konstrukcí. Typizační směrnice, 1980.
- [32] **VODNÍ CESTY, a.s.** Socioekonomická analýza prodloužení Bařova kanál o Úsek Hodonín – Soutok Morava/Dyje. Technická studie – G) rozpočet. 2006. [online] [cit. 01.04.2022]. Dostupné z: <https://www.kr-jihomoravsky.cz/Default.aspx?PubID=179797 &TypeID=7>
- [33] **Statista.** PPI of concrete products in U.S. 1990-2020. [online] [cit. 01.04.2022]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/195544/us-producer-price-index-of-concrete-products-since-1990/>
- [34] **Federal Reserve Economic Data.** Producer Price Index by Commodity: Metals and Metal Products: Iron and Steel (WPU101) [online] [cit. 01.04.2022]. Dostupné z: <https://fred.stlouisfed.org/series/WPU101>
- [35] Software SCIA Engineer 20.0 (Studentská licence)
- [36] ČSN 73 1404. Navrhování ocelových konstrukcí vodohospodářských staveb. 1999.
- [37] **ČÚZK** Analýza výškopisu [online] [cit. 24.02.2022]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/av/>
- [38] **Jandora Jan, Šulc Jan.:** *Hydraulika*. Akademické Nakladatelství CERM Brno, 2006.

- [39] **HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ.**: Hydraulika: příklady. Praha:
Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01586-6

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Satelitní snímek zájmové oblasti [1]	9
Obrázek 2: Vývoj řečiště Berounky v zájmové oblasti [2].....	10
Obrázek 3: Jez Modřany [4]	11
Obrázek 4: Vrtná prozkoumanost s vyznačenými vybranými vrty [6].....	12
Obrázek 5: Ústí Radotínského potoka do Berounky v Radotíně	14
Obrázek 6: Oblast soutoku Vltavy a Berounky za povodně v roce 2013 [12]	15
Obrázek 7: Mapa aktivní zóny (fialově) a záplavového území Q_{100} (modře) v zájmové oblasti [13].....	15
Obrázek 8: Záměr splavnění Berounky v zájmové oblasti podle generelu z roku 2012 [17][19][20]	17
Obrázek 9: Územní plán hl. m. Prahy se zakreslenými jezery 2006 [22].....	18
Obrázek 10: Ověřovací studie Radotínská jezera 2009 [23]	19
Obrázek 11: Alternativní studie Radotínských jezer 2012 [24].....	19
Obrázek 12: Komplexní urbanisticky krajinářský návrh – Sportovně rekreační areál Radotín 2015 [25]	20
Obrázek 13: Předpokládaný profil jezu Radotín (pohled po vodě)	21
Obrázek 14: Konstrukce hydrostatický uzávěrů. Zleva: sektor, segment s ložisky na vzdušné straně a segment s ložisky na návodní straně [28].....	25
Obrázek 15: Porovnání měrných křivek dle typu uzávěru pro jez o 3 polích po 20 m ..	34
Obrázek 16: Geometrie Jamborova prahu [28].....	35
Obrázek 17: Porovnání měrných křivek v závislosti na výšce Jamborova prahu	35
Obrázek 18: Doporučený tvar příčného řezu duté klapky [31].....	40
Obrázek 19: Vizualizace klapkového uzávěru (bez dolní vody)	41
Obrázek 20: Model klapkový uzávěru v programu SCIA Engineer 20 [35].....	41
Obrázek 21: Měrná křivka koryta pod jezem vycházející ze zjednodušeného modelu..	46
Obrázek 22: Zjednodušená geometrie profilu použitá pro model (2x převýšené) [37]..	47
Obrázek 23: Tvarové součinitele předního zhlaví a jejich předsazení [28].....	47
Obrázek 24: Schéma pro výpočet přelivu přes klapku	48
Obrázek 25: Graf pro určení rozšířeného přepadového součinitele M_{KL} pro klapku [27]	49

Obrázek 26: Měrná křivka výsledného vybrané varianty klapkového jezu.....	50
Obrázek 27: Schéma výpočtu měrné křivky segmentu s nasazenou klapkou	51
Obrázek 28: Hodnoty μ_v pro výtok pod segmentem [39]	52
Obrázek 29: Hodnoty μ_v pro výtok pod segmentem [39]	53
Obrázek 30: Schéma pro přeliv přes sektorový uzávěr	53
Obrázek 31: Schéma posouzení vývaru u klapkového jezu	54
Obrázek 32: Vizualizace navržené jezu	58
Obrázek 33: Laneho řešení vztlaku při běžném stavu	62
Obrázek 34: Schéma zatěžovacích stavů a) a b).....	63
Obrázek 35: Schéma sil působící na jezovou část při zatěžovacím stavu a)	65
Obrázek 36: Schéma sil působící na vývarovou desku při zatěžovacím stavu a).....	67
Obrázek 37: Schéma sil působící na vývarovou desku při zatěžovacím stavu b)	68

10. Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané vrty v okolí jezového profilu [6].....	13
Tabulka 2: N-leté průtoky na stanici Praha-Radotín [10].....	13
Tabulka 3: M-denní průtoky pro profil ř. km 8,143 [8].....	13
Tabulka 4: Úrovně hladiny při N-letých průtocích v profilu jezu [14]	16
Tabulka 5: Fullerův trojúhelník pro určení vah jednotlivých kritérií	28
Tabulka 6: Bodování jednotlivých variant jezového uzávěru.....	29
Tabulka 8: Odhad spotřeby oceli na jezový uzávěr dle typu uzávěru [27][29]	31
Tabulka 9: Orientační přehled typů pohyblivých jezu v České republice	32
Tabulka 10: Poměry výšky Jamborova prahu a hloubky vody před ním v závislosti na povodňových průtocích.....	36
Tabulka 11: Spotřeba materiálů jednotlivých variant výšky Jamborova prahu a počtu polí	37
Tabulka 12: Porovnání nákladů jednotlivých variant a).....	37
Tabulka 13: Porovnání nákladů jednotlivých variant b).....	38
Tabulka 14: Ceny jednotlivých položek z roku 2006 [32]	38
Tabulka 15: Základní parametry o navrženého klapkového uzávěru	40
Tabulka 16: Maximální posun na zatíženém uzávěru	43
Tabulka 17: Síly působící v ložiskách v kN	43
Tabulka 18: Souřadnice proudnicového tvaru zadního zhlaví pilíře [28]	48
Tabulka 19: Součinitel zatopení σ_z [38]	50
Tabulka 20: Opravný součinitel sklonu σ_{sk} pro přelivnou stěnu skloněnou o úhel δ [39]	54
Tabulka 21: Součinitel K v závislosti na poměr y_2/y_1 [28].....	56
Tabulka 22: Posouzení hloubky vývaru ($d=1,3$ m) bez prahových rozražečů při manipulaci s jednou klapkou	56
Tabulka 23: Posouzení hloubky vývaru ($d=0,8$ m) s prahovými rozražeči při manipulaci s jednou klapkou	57
Tabulka 24: Posouzení délky vývaru ($d=0,8$ m) s prahovými rozražeči při manipulaci s jednou klapkou	57

Tabulka 25: Posouzení hloubky vývaru ($d=0,8$ m) s prahových rozražeči při manipulaci se dvěma klapkami.....	57
Tabulka 26: Síly působící na vývarovou desku při zatěžovacím stavu a) a jejich ramena k bodům otáčení.....	64
Tabulka 27: Síly působící na vývarovou desku a jejich ramena k bodů otáčení při zatěžovacím stavu a).....	66
Tabulka 28: Síly působící na vývarovou desku a jejich ramena k bodům otáčení při zatěžovacím stavu b).....	68

11. Seznam příloh

- A.1 Deformace klapkového uzávěru při plném zahrazení
- A.2 Deformace klapkového uzávěru při sklopení o 0,6 H
- A.3 Deformace klapkového uzávěru při úplném sklopení
- A.4 Napětí na krajní diafragmě
- B.1 Situace
- B.2 Půdorys jezu
- B.3 Vzorový řez jezem A-A'
- B.4 Klapkový uzávěr řez B-B'
- B.5 Klapkový uzávěr řez C-C'