



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

STATICKÉ ŘEŠENÍ PŘÍČNÉHO ŘEZU PLAVEBNÍ KOMORY

STATIC ANALYSIS OF THE CROSS-SECTION OF THE LOCK CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Stanislav Skalník

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ ZICH, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Stanislav Skalník
Název	Statické řešení příčného řezu plavební komory
Vedoucí práce	doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

1. Stavební podklady.
2. Normy pro navrhování betonových konstrukcí ČSN a EN.
3. L. Gřenčík: Betonové konstrukce II. SNTL/ALFA 1986.
4. D. Majdúch: Zásady vystužování betonových konstrukcí. ALFA 1984.
5. Vhodné výpočetní programy (např. Nexis, SCIA, Ansys apod.).
6. Zich M., Bažant Z., Montované betonové konstrukce, CERM 2018.
7. Zich M., Bažant Z., Plošné konstrukce, nádrže a zásobníky, CERM 2010.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provést rešerši konstrukčního řešení plavebních komor, pro vybraný typ provést statické ověření. Řešení provést včetně nezbytné výkresové dokumentace (výkresy tvaru a výztuže). Rozsah bakalářské práce stanoví vedoucí práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti dle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1) Použité podklady

P2) Statický výpočet

P3) Výkresová dokumentace

P4)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x), Popisný soubor závěrečné práce (1x)

Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

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

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá statickým řešením příčného řezu plavební komory. Podkladem pro tuto práci byly statické výpočty dle stupňů bezpečnosti a výkresová dokumentace skutečné konstrukce. Cílem je posouzení stávajícího řešení stěn a dna komory ve vybraných řezech na základě vnitřních sil stěnového modelu vytvořeného v programu SCIA Engineer. Následné provedení globální analýzy nelineárního modelu v programu Idea StatiCa Detail, vyztuženého hlavní nosnou výztuží dle původního návrhu. Druhou částí této práce byl návrh alternativního řešení komory typem žebrových stěn s ověřením dimenzovatelnosti. Návrh hlavní výztuže stěny a nejvíce namáhaného žebra. Dále porovnání s původním řešením z hlediska deformací, úspory materiálu a následného posouzení na vyplavání komory. Součástí této práce jsou statické výpočty obou variant, výkresy použité výztuže pro nelineární model a výkresy alternativního řešení obsahující tvar a schémata výztuže stěn a žebra.

KLÍČOVÁ SLOVA

Plavební komora, statické řešení, polorámová konstrukce, železobeton, beton, výztuž, ocel, stěna, dno, žebro, nelineární model, interakce normálové síly a ohybového momentu, zatížení, dimenzování, únosnost, mezní stavy, výkresová dokumentace.

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with static solutions of the lock chamber. Background for this work were static calculations according to safety levels and drawing documentation of the actual structure. Goal is to evaluate the existing solution of the walls and the bottom of the chamber in selected sections based on the internal forces of the wall model created in the SCIA Engineer. Following with global analysis of a nonlinear model reinforced with the main load-bearing reinforcement according to the original design created in the Idea StatiCa Detail. The second part of this work was the design of an alternative solution of the chamber with a type of rib walls with dimensionability verification. Suggestion of the main wall reinforcement and reinforcement of the most stressed rib. Furthermore a comparison with the original solution from the point of view of deformation, material savings and subsequent assessment of the chamber leaching. Static calculations of both variants, drawings of the used reinforcement for the nonlinear model and drawings of an alternative solution containing the shape and schemes of the wall and rib reinforcement are included.

KEYWORDS

Lock chamber, static solution, half – frame structure, reinforced concrete, concrete, reinforcement, steel, wall, bottom, rib, nonlinear model, interaction of normal force and bending moment, load, dimensioning, load capacity, limit states, drawing documentation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Stanislav Skalník *Statické řešení příčného řezu plavební komory*. Brno, 2022. 34 s., 145 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Statické řešení příčného řezu plavební komory* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

Stanislav Skalník
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Statické řešení příčného řezu plavební komory* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2022

Stanislav Skalník
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Miloši Zichovi, Ph.D. za ochotu vést moji práci, trpělivost a za cenné rady v průběhu jejího zpracování. Dále děkuji za možnost nahlédnutí do běžně nepřístupných míst plavební komory a obohacení znalostí při její prohlídce.

Rovněž bych rád poděkoval své rodině a blízkým přátelům za podporu během mého dosavadního studia.

Obsah

1	ÚVOD	11
1.1	Problematika plavebních komor	11
1.2	Příčné řezy plavebních komor	11
2	Řešená plavební komora.....	17
2.1	Konstrukční řešení.....	18
2.1.1	Dnová deska	18
2.1.2	Stěny plavební komory	19
2.1.3	Dolní vrata.....	20
2.1.4	Horní vrata	21
2.2	Pravá plavební komora	21
3	Materiálové charakteristiky.....	22
3.1	Beton.....	22
3.2	Ocel	22
4	Zatížení	23
4.1	Stálé zatížení.....	23
4.2	Užitné zatížení.....	23
4.3	Zatěžovací stavy	23
4.4	Kombinace zatížení.....	24
4.4.1	Kombinace pro mezní stavy únosnosti	24
4.4.2	Kombinace pro mezní stavy použitelnosti	25
5	Modely.....	25
5.1	Lineární model – SCIA Engineer.....	25
5.1.1	Okrajové podmínky	26
5.1.2	Zatěžovací stavy.....	26
5.2	Nelineární model – Idea StatiCa Detail	26
5.3	Srovnání deformací	26
6	Posouzení komory	27
6.1	Posouzení na MSÚ	27
6.1.1	Posouzení stěn.....	27
6.1.2	Posouzení základové desky	27
6.1.3	Posouzení dnové desky.....	27
6.2	Posouzení na MSP	27
7	Alternativní návrh stěn plavební komory	27

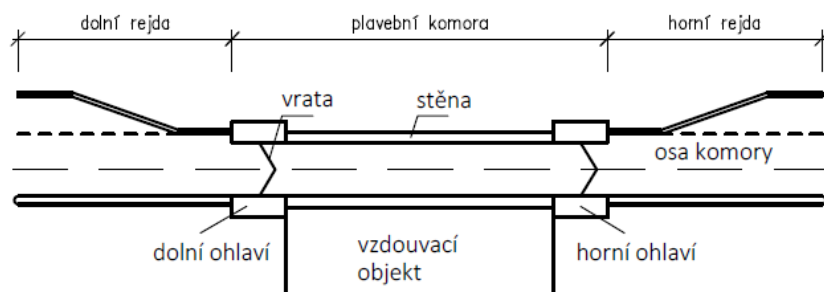
7.1	Návrh rozměrů.....	28
7.2	Stěna	28
7.3	Žebro.....	28
7.4	Porovnání variant	28
7.5	Materiálové charakteristiky alternativního řešení	29
7.5.1	Beton	29
7.5.2	Ocel.....	29
8	Závěr	30
9	Použité zdroje	31
10	Seznam obrázků	33
11	Použité programy	34
12	Seznam příloh	34

1 ÚVOD

1.1 Problematika plavebních komor

Plavební komora je určena pro překonání výškových rozdílů na vodních cestách vytvořených vzdouvacím zařízením, tím můžou být například přehrady nebo jezy. Jejím účelem je umožnit lodím pohyb ve vertikálním směru, ať už ve směru z horní zdrže do dolní či naopak. Bývá zpravidla navržena jako jednostupňová, kdy je celý výškový rozdíl překonán najednou, což má za následek větší spotřebu vody při jejím proplování. Alternativou může být kaskáda odstupňovaných komor s nižší spotřebou vody, toto řešení ovšem prodlužuje dobu proplování.

Plavební komora jako taková je nádrž ohraničená stěnami, horním a dolním ohlavím, která jsou opatřena vodotěsnými vraty. Půdorys bývá nejčastěji obdélníkového tvaru o rozměrech daným charakterem vodní cesty – klasifikační třídou a její kapacitě, podle níž se dále volí návrh jedné komory či soustavy více komor vedle sebe. Velikost plavební komory dále ovlivňuje způsob jejího plnění, u menších typů, lze užít přímého plnění a prázdnění pomocí otvorů ve vratech, na větších plavebních komorách je využíváno nepřímé plnění a prázdnění, které zajišťuje soustava kanálů a obtoků ať už je jejich vyústění ve stěnách nebo dně plavební komory.



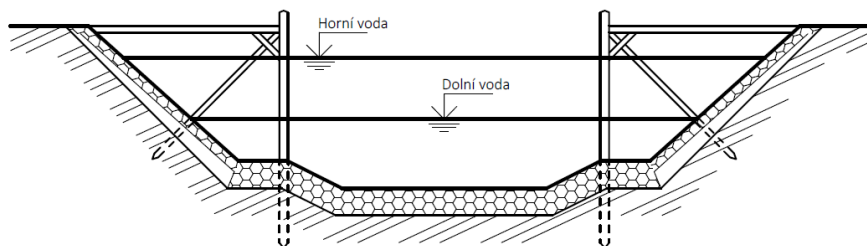
Obr. 1 Schéma plavební komory [1]

1.2 Příčné řezy plavebních komor

Příčným řezem plavební komory je zpravidla žlab tvaru písmene U, ohraničený v podélném směru horním a dolním ohlavím. V příčném směru je pak tvořen stěnami z různých materiálů, kterými může být například kámen, beton nebo ocel. Ze spodní strany je ohraničen obvykle dnovou deskou, v případě starších typů plavebních komor založených na skalním podložím může již toto tvořit samotné dno komory.

Koryto se zpevněnými bočními svahy

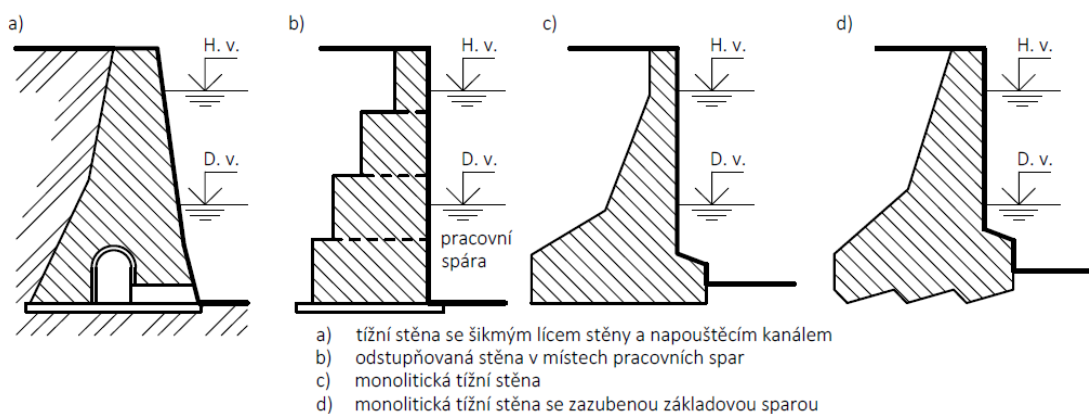
Jedná se nejjednodušší typ, umožňující překonání malých výškových spádů, v lokálních situacích na nevýznamných vodních cestách. Tyto je vhodné vybavit vnitřními svodidly, které udržují plavidlo ve střední části komory. Je zde užito přímého plnění.



Obr. 2 Komora se zpevněnými svahy vodního toku [12]

Plavební komory s tížnými stěnami bez dnové desky

Tento typ plavebních komor byl nejčastěji budován v minulosti, a to obvykle na skalním podloží. Stěny se obvykle vyzdívaly z různých materiálů, nejčastěji z kamene, dříve byl líc stěny šikmý, později se přecházelo na líc svislý. Rub těchto stěn byl volen šikmý případně odstupňovaný. Postup návrhu lze přirovnat k návrhu tížné opěrné stěny. Problémem takto budovaných komor může být jejich úplné vyčerpání v případě, že dno není tvořeno kompaktním podložím, jedná se zejména o rozpraskané horniny. U tohoto typu lze užít jakéhokoliv druhu plnění, rovněž jej lze navrhnout nezávisle na překonávaném spádu. Ze statického hlediska je takové stěny třeba posoudit na překlopení, posunutí v základové spáře a prokázat únosnost základové půdy v základové spáře. Pro zvýšení únosnosti je vhodné vytvořit základovou zazubenou, nejlépe s kolmými plochami na výslednici sil od zemního tlaku, čímž je redukován posun konstrukce, ta může být potom navržena mnohem hospodárněji.



Obr. 3 Plavební komory s tížnými stěnami bez dnové desky [1]



Plavební komory Vrané nad Vltavou

- délka plavební komory:
134,0 / 85,0 m (velká / malá)
- spád:
10,8 m
- šířka plavební komory:
12,0 m

Obr. 4 Plavební komory Vrané nad Vltavou [15]



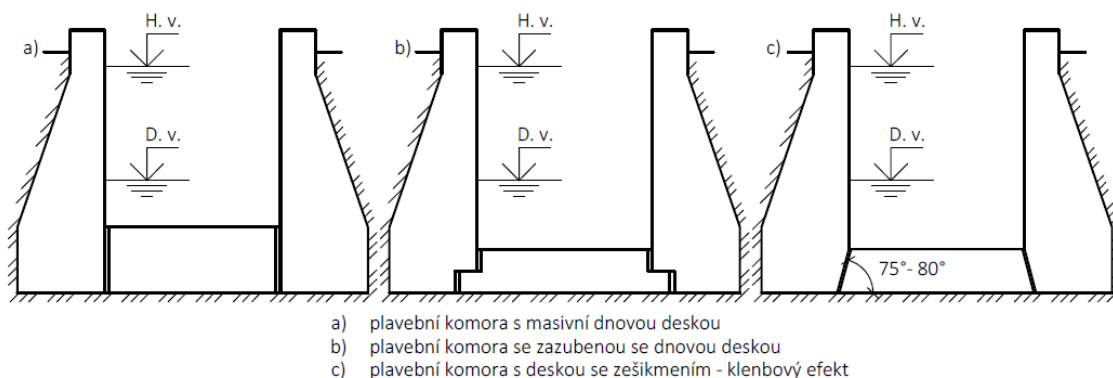
Plavební komora Staré město –
Baťův kanál

- délka plavební komory:
51,7 m
- spád:
1,14 m
- šířka plavební komory:
5,3 m

Obr. 5 Plavební komora Staré Město Baťův kanál [16]

Plavební komory s oddílatovanou spodní deskou

Tyto komory se navrhovaly zpravidla při neskálním podloží, použití je obdobné jako u plavebních komor bez dnové desky. Lze je rozdělit podle typu dilatační spáry, v případě že se jednalo o spáru svislou, muselo se jednat o masivní dnové desky, které musely vzdorovat vlastní tíhou vztlaku spodní vody. V případě že se spára zazubila, došlo k přitížení desky stěnami, ta pak mohla být subtilnější, staticky však tvoří prostý nosník, taková deska již často musela být armována. U vhodné zvolené zešíkmení dilatační spáry dochází ve dnové desce ke klenbovému efektu, kdy je tato deska namáhána primárně tlakem a tím se stává úspornější z hlediska vyztužování.



Obr. 6 Plavební komory s oddilatovanou dnovou deskou [12]



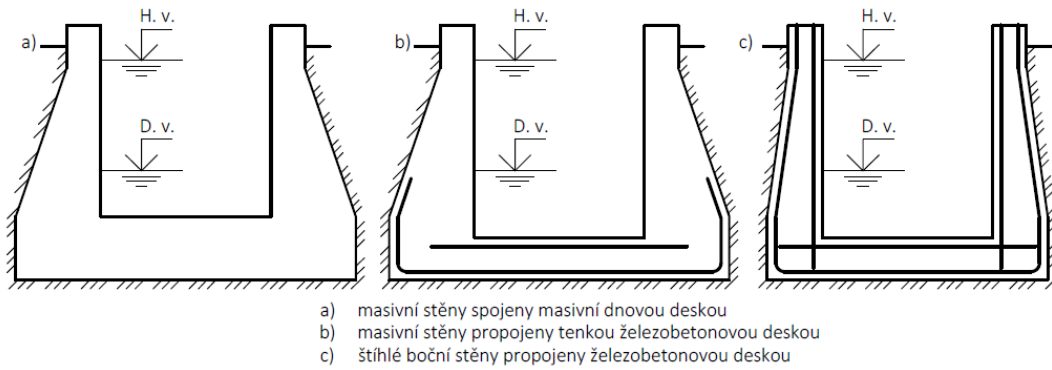
Plavební komora Brandýs nad Labem

- délka plavební komory:
85,0 m
- spád:
3,8 m
- šířka plavební komory:
12,0 m

Obr. 7 Plavební komora Brandýs nad Labem [15]

Plavební komory polorámového typu

V současné době se jedná o nejčastěji navrhovaný typ plavebních komor, vznikl spojením dna a stěn v jeden monolitický celek. Jeho užití lze uplatnit bez závislosti na rozměrech, překonaném výškovém spádu, tak i způsobu plnění. Rovněž je možné budování těchto komor na pružném a propustném podložím, jelikož dochází k roznosu zatížení a velkou plochu. Umožňuje také úplné vyčerpání, což je výhodné v případě revizí a oprav těchto komor. Tyto jsou navrhovány nejčastěji jako železobetonové a jejich nepropustnost vyžaduje posouzení na vyplavání komory vlivem vzlaku podzemní vody.



Obr. 8 Plavební komory polorámového typu [12]



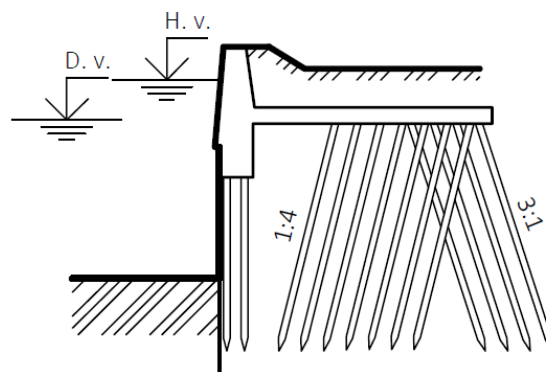
Plavební komora Pardubice

- délka plavební komory:
85,0 m
- spád:
3,9 m
- šířka plavební komory:
12,0 m

Obr. 9 Plavební komora Pardubice [15]

Plavební komory s vytvořené z bočních zdí na vysokém pilotovém roště

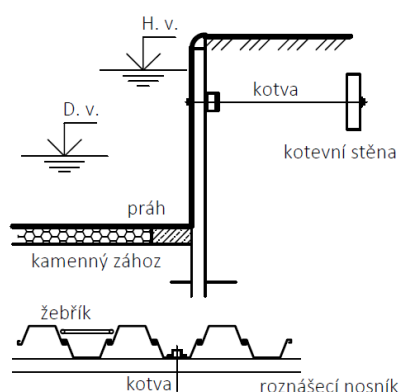
Budují se obvykle v jemnozrnných zeminách v přímořských oblastech, pro dosažení velké plavební hloubky pro mořské lodě. Konstruktivně jsou řešeny jako soustava svislých a šikmých pilot, nad nimiž se vybetonuje betonová stěna, která se nachází v rozmezí mezi spodní a horní vodou v komoře. Vodní spád těchto komor bývá zpravidla kolem 25 m.



Obr. 10 Stěna plavební komory na vysokém pilotovém roště [12]

Plavební komory z ocelových štětovic

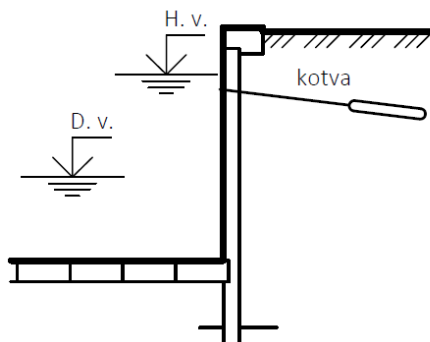
Plavební komory z ocelových štětovic se rovněž navrhují v jemnozrnných zeminách jako jsou písky, hlíny a jíly. Z důvodu kotvení stěn jsou poměrně náročné na prostory v okolí stěny. Kotvení se provádí za pomoci rektifikovatelných kotev propojených roznášecím nosníkem, a to nejlépe v jednom místě, více řad těchto kotev je náročné na statické řešení vzhledem k zajištění spolupůsobení kotev. Dno těchto komor je na rozdíl od stěn propustné, což může mít za následek vyplavování jemných částic, tomuto je nutno zabránit vhodným opatřením, například kamenným záhozem. Tyto komory nelze úplně vyčerpát, výška je limitována délkou ocelových štětovic. Pro plnění a vyprazdňování se nejčastěji využívá přímé plnění, případně plnění z krátkými obtoky.



Obr. 11 Konstrukce stěny z ocelových štětovic [1]

Plavební komory z prefabrikovaných a montovaných částí

Takto navržené plavební komory jsou obvykle složeny z prefabrikátů tvaru L, výhody těchto komor jsou uplatňovány při více stejných komorách na vodním toku. Jednotlivé prefabrikáty musí být kotveny, lze využít přitížení zeminou. Spoje jednotlivých prefabrikátů musí být těsněny, což zajišťuje pryžové těsnění umístěné do připravené drážky a následně zalité betonem.



Obr. 12 Komory z prefabrikovaných dílců stěn a dna [1]

2 Řešená plavební komora



Obr. 13 Pohled do plavební komory VD Gabčíkovo 1)

Plavební komory VD Gabčíkovo, Slovenská republika

- délka plavební komory: 275,0 m
- spád: 12,7 – 23,6 m
- šířka plavební komory: 34,0 m
- dvojice totožných komor

Bakalářská práce je zaměřena na statické řešení plavební komory na vodním díle Gabčíkovo na řece Dunaj, konkrétně na charakteristický příčný řez pravé komory. Jedná se sestavu dvou totožných plavebních komor, z hlediska rozměrů se jedná o jednu z největších plavebních komor na světě. Plavební komory byly jedněmi z objektů plánovanými na vodním díle Gabčíkovo-Nagymaros. Rozhodnutí o výstavbě díla proběhlo mezi stranami někdejšího Československa a Maďarska v roce 1977, samotná realizace počala v roce 1978. V roce 1989 maďarská strana odstoupila od smlouvy dokončit Soustavu vodních děl Gabčíkovo-Nagymaros (SVD G-N), proto rozhodla Československé vláda o dokončení díla v takzvané „variantě C“, kdy bylo dílo dokončeno pouze na straně tehdejšího Československa. Na základě tohoto usnesení bylo vodní dílo Gabčíkovo uvedeno do provozu roku 1992. [10]

V roce 2017 byl investorem kterým je Vodohospodárska výstavba, štátny podnik vypsán tendr s názvem „Inovácia a modernizácia plavebných komôr pre zvýšenie bezpečnosti a intenzity vodnej dopravy na vodnom diele Gabčíkovo“. Projektantem akce je společnost AQUATIS a.s. Výhercem zakázky byla firma Metrostav a.s.. Od roku 2019 probíhají stavební práce, zejména kompletní výměna veškerých ocelových částí, hydraulického systému, řídicího systému sanace betonových konstrukcí, dilatačních spár a mnohé další. Plánované dokončení je přibližně v polovině roku 2022. [11]

Samotný objekt plavebních komor se skládá ze dvou plavebních komor, systému plnicích a vyprazdňovacích kanálů, horních a dolních rejd. Užité délka komory dosahuje 275 metrů a šířky 34 metrů, v závislosti na vodním stavu umožňuje komora překonat spád 12,7 až 23,6 metrů. Samotná stěna dosahuje výšky 31,1 metrů. Jednotlivé komory jsou od sebe oddílatovány, samotná komora se pak skládá celkem ze 6 dilatačních bloků o délce cca 45 metrů a dolního a horního ohlavi komory.

Z hlediska systému plnění a prázdnění komory se jedná o světový unikát, kdy je každá komora plněna, respektive vyprazdňována čtyřmi kanály o rozměrech 4x4 metry. Doba plnění trvá přibližně 16 minut a vyprazdňování necelých 14 minut. Jedná se o složitý systém dlouhých obtoků ve dně plavebních komor. [1]

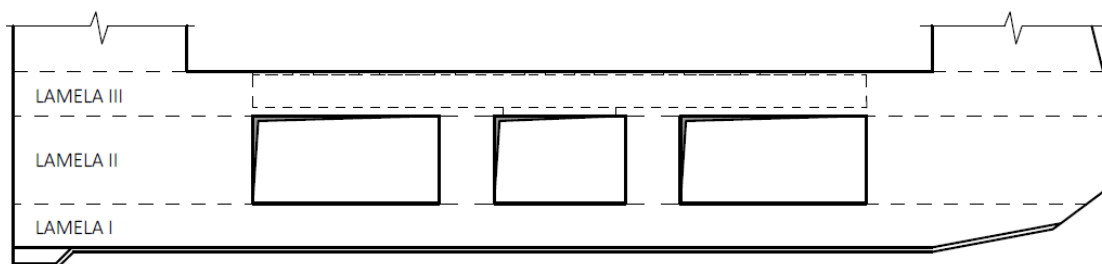
Konstrukčně se jedná o komoru polorámového typu. Konstrukce byla vybudována z betonu MV 8 – T100 – 250 B20, vyztužena betonářskou výztuží 10425 ΦV s mezí kluzu 420 MPa. Byly použity na zdejší poměry průměry neobvyklých rozměrů Φ40, Φ50.

2.1 Konstrukční řešení

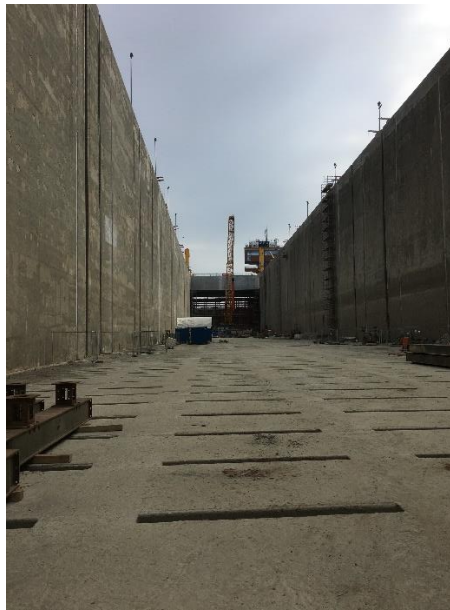
2.1.1 Dnová deska

Dnová deska komory o celkové tloušťce 8 metrů je složena z celkem tří lamel, tyto lamely vždy tvořily jeden pracovní záběr. Lamela I o tloušťce 2 metry tvoří základovou desku, je vyhotovena na podkladním betonu tloušťky 200 mm. Lamela II, ve které se nachází plnicí a vyprazdňovací systém komory je shodná s výškou kanálů tj. 4 metry. Lamela III opět o tloušťce 2 metry, jejíž horní líc tvoří samotné dno komory. Jsou zde osazeny ocelové trubky průměru 1500 mm, jež jsou propojeny se středním kanálem v lamele II štěrbinou o rozměrech 5,12 x 0,6 m, ústí do samotné komory je rozloženo po dně štěrbinami šířky 0,2 m s rozdílnými délkami napříč dnem. Změnou od projektové dokumentace bylo osazení prefabrikovaných panelů jako ztraceného bednění stropů nad systémem kanálů.

Ze statického hlediska tvoří lamela I a III sestavu vzpěry a táhla pro přenesení ohybového momentu ve dnové desce, kdy se jejich role mění v závislosti na kombinaci zatížení, zemní tlak vyvozuje tlakové namáhání v lamele III a tahové namáhání v lamele I. V případě zatížení hydrostatickým tlakem uvnitř komory je toto namáhání opačné, tudíž je lamela III tažena a lamela I tlačena.



Obr. 14 Dno komory – schéma



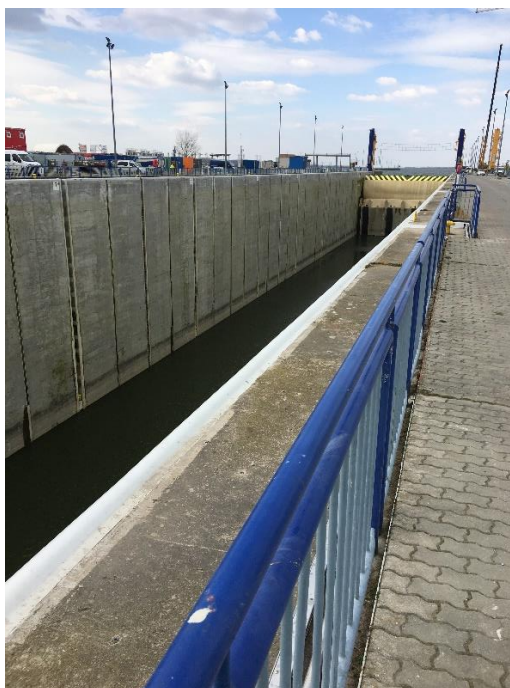
Obr. 15 Dno plavební komory se štěrbinami pro plnění a prázdnění
1)



Obr. 16 Pohled do ocelové trubky průměru 1,5m z prostředního
kanálu 1)

2.1.2 Stěny plavební komory

Výška stěny dosahuje 30,1 metrů, při realizaci byla rozdělena do 10 lamel po třech metrech, které tvořily pracovní záběry. V patě je tloušťka stěny 7,8 metrů, na koruně pak 1,5 metru. Rub stěny je zešikmen ve sklonu $14,2^\circ$ od svislice do výšky 18 metrů, zbylá část stěny pak se sklonem $8,2^\circ$, líc stěny je svislý po celé výšce stěny. Na lící stěny se nachází svislé drážky, v nichž jsou umístěny bitvy s plovoucím vázacím zařízením a žebříky, koruna stěny na vnitřní straně je opancéřovaná ocelovou trubkou. Samotná stěna působí jako konzola, která musí odolávat účinkům zemního tlaku a zatížení hydrostatickým tlakem uvnitř komory.



Obr. 17 Pohled na stěnu plavební komory 1)

2.1.3 Dolní vrata

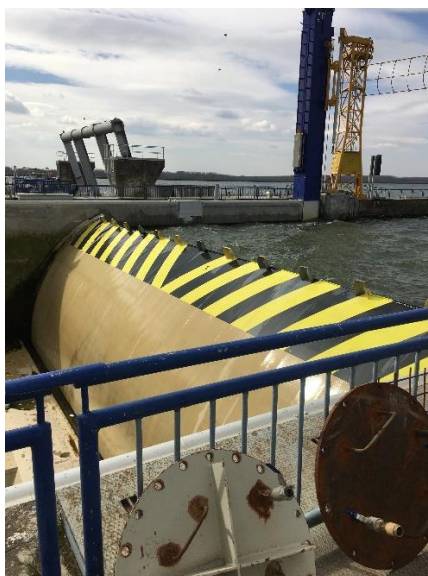
Jedná se o desková ocelová vrata složené ze dvou vrátní, s rozměrem jedné vrátně 19,6 x 22 metrů o hmotnosti přibližně 460 tun. Tyto vrata komory se opírají o horní betonový práh na mostovce komunikace, dále pak o dolní práh ve dně plavební komory. Na bočních stranách jsou vrátně podpírány lokálně kulovými ložisky.[11]



Obr. 18 Dolní vrata komory s mostovkou komunikace 1)

2.1.4 Horní vrata

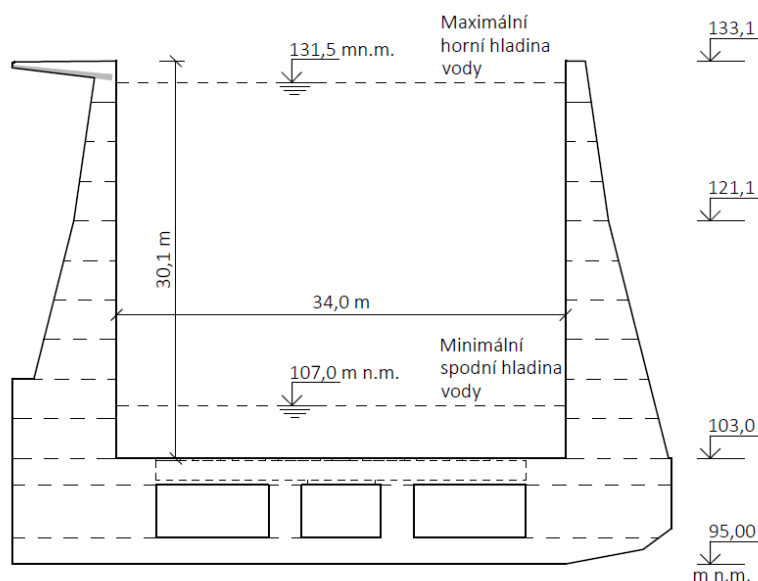
Horní vrata jsou segmentová, tyto oddělují horní zdrž od komory. Dále umožňují za jezového provozu přepouštění ledových ker a nečistot přes plavební komoru, horní ohlaví pod vrata je pro tyto případy opacněrováno a opatřeno rozrážčem. [11]



Obr. 19 Horní segmentová vrata 1)

2.2 Pravá plavební komora

Následující kapitoly se dále budou zabývat pouze statickým řešením pravé plavební komory, a to jejím charakteristickým výsekem. Přepočtem zatížení a následného posouzení konstrukce dle současných norem s hlavním zaměřením na betonové průřezy dle ČSN EN 1992-2 Eurokód 2



Obr. 20 Výsek příčného řezu pravé plavební komory

3 Materiálové charakteristiky

3.1 Beton

MV 8 – T100 – 250 (Tř. III)

- označení vodostavebného betonu dle ČSN 73 1209 – norma zrušena
- pevnostní třída dle ČSN 73 2001:1970 – norma zrušena
- dle ČSN EN 206-1 beton třídy C16/20

Materiálové charakteristiky: dle ČSN EN 1992-1-1 Tabulka 3.1

$$f_{ck} = 16 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cc} = 1,0$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{16}{1,5} = 10,67 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 1,9 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$$

$$E_{cm} = 27,0 \text{ GPa}$$

ČSN 73 1201:1967 neplatná	ČSN 73 2001:1970 neplatná	ČSN 73 2400:1989 neplatná	ČSN EN 206-1 platná
0I	B 60 B 80	(B 3,5) B 5	C -/5
0	B 105	B 7,5	C -/7,5
I	B 135	B 10 B 12,5	C 8/10
II	B 170	(B 13,5) B 15	C 12/15
III	B 250	B 20 B 25	C 16/20 C 20/25

Obr. 21 Srovnávací tabulka pevnostních tříd betonů [13]

3.2 Ocel

10425 V, c = 2,30

- označení oceli dle ČSN 42 5535 – norma zrušena

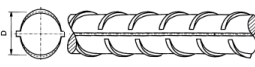
$$f_{yk} = 420 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{420}{1,15} = 365,22 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200,0 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{365,22}{200} = 1,83 \text{ ‰}$$

10 425	V		ČSN 42 5535
10 426	W		

Obr. 22 Betonářská výztuž 10 425 V [14]

4 Zatížení

4.1 Stálé zatížení

Do stálého zatížení bylo uvažováno s vlastní tíhou komory.

Dále se zatížením zvýšeným aktivním zemním tlakem s přitížením povrchu terénu plošným zatížením o intenzitě 20 kN/m^2 . Zemní tlak byl vypočten dle ČSN 73 0037 Zemní tlak na stavební konstrukce [4], jako podklad pro vlastnosti zásypových zemin byly použity hodnoty dle původního statického výpočtu. Použití zvýšeného aktivního tlaku bylo odůvodněno nedostatečnou deformací pravé stěny, tyto mezní hodnoty se v rozdílných literaturách různí. V této práci je uvažováno s hodnotou mezní deformace pro plnou aktivaci zemního tlaku $0,002 \text{ mm/m}$ výšky stěny [17]. Pro danou výšku stěny $30,1$ metrů by tato mezní deformace dosahovala $60,2$ milimetru. Vyhodnocení situace bylo na základě lineárního modelu, kde vodorovný posun koruny stěny u_x dosáhl hodnoty $44,7$ milimetru. Součinitel zvýšeného aktivního tlaku byl stanoven na $0,25$.

Mezi další stálá zatížení byl zařazen vztlak vody pod úrovní hladiny spodní vody, ta byla pro výpočet uvažována na výškové kótě $118,0$ m n.m. což odpovídá $15,1$ metrů pod povrchem.

Charakteristiky zásypové zeminy – šterkopísky
(dle původního statického výpočtu)

objemová tíha suché zeminy	$\gamma_z = 21,0 \text{ kN/m}^3$
objemová tíha zeminy pod HPV	$\gamma_{z,\text{sat}} = 11,0 \text{ kN/m}^3$
úhle vnitřního tření	$\varphi = 36^\circ$
Poissonovo číslo	$\nu = 0,3$
úhel tření mezi zeminou a stěnou	$\delta = \frac{2}{3} \cdot \varphi = \frac{2}{3} \cdot 36 = 24^\circ$

4.2 Užité zatížení

Jako užité zatížení komory je považováno ve výpočtu zatížení hydrostatickým tlakem uvnitř komory. Do výpočtu byly použity dva limitní stavy vody uvnitř komory. Pro plnou komoru s hladinou vody na kótě $131,5$ m n.m., což odpovídá vodnímu sloupci $28,5$ metru ode dna. Pro minimální užité hladinu vody uvnitř komory dosahuje voda výšky $4,0$ metrů ode dna, hladina na kótě $107,0$ m n.m..

4.3 Zatěžovací stavy

Pro stálé zatížení bylo uvažováno s následujícími zatěžovacími stavy:

- ZS 1 Vlastní tíha
- ZS 2 Zemní tlak vodorovný
- ZS 3 Zemní tlak svislý
- ZS 4 Vztlak vody

Pro užité zatížení vodou uvnitř komory:

- ZS 5 Voda uvnitř komory MAX (hladina vody na kótě 131,5 m n.m.)
- ZS 6 Voda uvnitř komory MIN (hladina vody na kótě 107,0 m n.m.)

4.4 Kombinace zatížení

Kombinace byly vytvořeny pro dvě mezní situace vycházející z ČSN EN 1991-4 [7]

- Prázdná komora – zatížena zemním tlakem bez vody uvnitř (vyčerpaná plavební komora, může nastat v případě udržovacích prací)
- Plná komora s odkopaným zemním tělesem (extrémní situace s níž dle původního návrhu nebylo uvažováno, jedná se však o situaci dle současných standardů)

4.4.1 Kombinace pro mezní stavy únosnosti

MSÚ – Prázdná komora

Obsahuje následující zatěžovací stavy:

- ZS 1 Vlastní tíha
- ZS 2 Zemní tlak vodorovný
- ZS 3 Zemní tlak svislý
- ZS 4 Vztlak vody

Součinitele zatížení

- vlastní tíha $\gamma_G = 1,35$
- zemní tlak $\gamma_{G,z} = 1,35$
- vztlak vody $\gamma_{G,w} = 1,1$

MSÚ – Plná komora (komora odkopaná, zemní tlak nepůsobí)

Obsahuje následující zatěžovací stavy:

- ZS 1 Vlastní tíha
- ZS 5 Voda uvnitř komory MAX

Součinitele zatížení

- vlastní tíha $\gamma_G = 1,35$
- tlak vody $\gamma_{Q,w} = 1,1$

4.4.2 Kombinace pro mezní stavy použitelnosti

Charakteristické kombinace:

MSP – Prázdná komora

Obsahuje zatěžovací stavy dle kombinace MSÚ Prázdná komora

Součinitele zatížení

- vlastní tíha $\gamma_G = 1,0$
- zemní tlak $\gamma_{G,z} = 1,0$
- vztlak vody $\gamma_{G,w} = 1,0$

MSP – Plná komora (komora odkopaná, zemní tlak nepůsobí)

Obsahuje zatěžovací stavy dle kombinace MSÚ Plná komora

Součinitele zatížení

- vlastní tíha $\gamma_G = 1,0$
- tlak vody $\gamma_{Q,w} = 1,0$

Kvazistálá kombinace:

MSP – Kvazistálá

Obsahuje následující zatěžovací stavy:

- ZS 1 Vlastní tíha
- ZS 2 Zemní tlak vodorovný
- ZS 3 Zemní tlak svislý
- ZS 4 Vztlak vody
- ZS 6 Voda uvnitř komory MIN

Součinitele zatížení

- vlastní tíha $\gamma_G = 1,0$
- zemní tlak $\gamma_{G,z} = 1,0$
- vztlak vody $\gamma_{G,w} = 1,0$
- tlak vody $\gamma_{Q,w} = 1,0$

5 Modely

5.1 Lineární model – SCIA Engineer

Pro daný tvar komory byl vytvořen stěnový model tloušťky 2 metry, a to z důvodu stejných osových vzdáleností ocelových trub ve dně komory. Jejich umístění způsobuje vznik železobetonových I profilů, tyto bylo nutné nahradit obdélníkem tloušťky 1,1 metru po celé délce dnové desky (lamely III) nad plnicími kanály.

5.1.1 Okrajové podmínky

Pro výpočet byl zvolen Winklerův model podloží. Tuhost zemní pružiny vychází ze skutečného měření svislého posunu komory od rozdílu hladiny spodní a horní vody uvnitř komory. Tímto měřením byl zjištěn posun $5 \div 10$ mm, na jehož základě byla vypočtena tuhost liniové podpory modelu 24,7 MPa/m.

5.1.2 Zatěžovací stavy

Pro stěnový model tloušťky 2 metry bylo nutno veškeré zatížení v kPa vynásobit zatěžovací šířkou $\xi_s = 2$ m

5.2 Nelineární model – Idea StatiCa Detail

Model pro nelineární analýzu řezu komory byl vytvořen ve stejné geometrii jako model ve SCII, byl však doplněn hlavní výztuží dle původní výkresové dokumentace, vytažené položky obsažené v modelu jsou uvedeny na samostatných výkresech v příloze P3 této práce.

5.3 Srovnání deformací

Tabulka 1 Porovnání deformací pro charakteristické kombinace

Model	Lokace	Kombinace	Deformace	
			vodorovný u_x [mm]	svislý u_y [mm]
Lineární	Koruna pravé stěny	Prázdná komora	-44,7	-5
		Plná komora	49,3	-20
	Střed dna komory	Prázdná komora	0	-2
		Plná komora	-1	-13,8
Nelineární	Koruna pravé stěny	Prázdná komora	-13,8	-49,9
		Plná komora	21,5	-79,3
	Střed dna komory	Prázdná komora	-2,8	-14,7
		Plná komora	-0,4	-28,3

Vyhodnocení:

Dle výše uvedených deformací dochází ke snížení vodorovného posunu ve prospěch nelineárního modelu, naopak ve svislém směru je patrný podstatný nárůst.

6 Posouzení komory

6.1 Posouzení na MSÚ

6.1.1 Posouzení stěn

Dle lineárního modelu byly ověřeny vybrané řezy stěn formou interakčních diagramů. Pro pravou stěnu v patě stěny na kótě 103,0, dále na kótách 112,0, 115,0, 124,0 a 130,0. V případě levé stěny byl počet řezů limitován s ohledem na stejné vyztužení řezů a obdobné účinky zatížení, konkrétně byly posouzeny řezy 103,0, 115,0 a 130,0. Všechny řezy vyhověly s jistou mírou rezervy co do únosnosti kombinace normálové síly a ohybového momentu, i případě smykové únosnosti, kde se jednalo o nejkritičtější místo v patě stěn s uvážením spon ve stěnách.

Pro posouzení bylo použito softwaru Idea StatiCa Rcs s ručním ověřením správnosti výpočtu.

6.1.2 Posouzení základové desky

Pro posouzení základové desky byly vybrány tři řezy pro pravý krajní kanál, v jeho krajích a uprostřed, stejný postup byl aplikován na vnitřní kanál. Zde došlo k nevyhovujícímu řezu v místě krajního pravého krajního kanálu na levém okraji pro kombinaci komora prázdná (zemní tlak bez vody uvnitř).

6.1.3 Posouzení dnové desky

Řezy byly rozmístěny obdobně jako u základové desky, v tomto případě nevyhovuje ani jeden z řezů pro kombinaci plná komora (voda uvnitř na maximální hladině, komora odkopaná)

6.2 Posouzení na MSP

Posouzení z hlediska mezních stavů použitelnosti příčného řezu komory vycházelo z globální nelineární analýzy modelu. Dle předpokladů z posouzení prvních mezních stavů i zde dochází k negativním posudkům. Předmětem bylo vyhodnocení omezení napětí, kdy je překročeno limitní napětí ve výztuži i v betonu.

7 Alternativní návrh stěn plavební komory

Součástí práce je navržení odlišné varianty řešení stěn. Pro tyto účely byla zvolena žebrová stěna řešená pro jeden dilatační celek vnitřního bloku komory za současného spojení obou komor a eliminaci problematické dilatační spáry mezi jednotlivými komorami, pro tuto variantu bylo nutné provést ověření dimenzovatelnosti, předběžného návrhu výztuže včetně schémat. Zatížení bylo uvažováno stejně jako v případě původního řešení s rozdílem zemního tlaku, zde se z důvodu očekávání větší deformace žebra plná aktivace zemního tlaku.

7.1 Návrh rozměrů

Stěna je navržena konstantní tloušťky 2 metry v celé výšce. Žebra jsou rozmístěna v osové vzdálenosti 10 metrů s krajními poli 2,5 metru, tyto by sloužily pro umístění těsnících pásů v dilatační spáře. Tloušťka žebra je rovněž 2 metry se šířkou v patě 9,8 metrů, toto rozšíření o 2 metry směrem do komory bylo pro zachování užité šířky 34 metrů vyřešeno zúžením vnitřního bloku mezi komorami.

7.2 Stěna

Výpočet stěny je řešen formou rozdělení stěny dle pracovních záběrů z původního řešení do deseti lamel s průměrovaným zatížením dané lamely. Pro analýzu vnitřních sil a reakcí pro následné zatížení žebra byl zvolen 1D prutový model výseku jednoho metru lamely s uvážením, že lamela tvoří spojitý nosník s převislými konci. Na základě vnitřních sil byl proveden návrh hlavní ohybové výztuže pro maximální ohybové momenty. V podstatné části stěny se jedná o výztuž dle konstrukčních zásad a bylo by na zvážení změnu tloušťky stěny po výšce.

7.3 Žebro

Analýza vnitřních sil byla provedena na upraveném stěnovém modelu původního řešení s přidáním zatížení reakcí od stěn z 1D modelu. Jelikož se jedná o značně namáhaný prvek bylo využito spolupůsobící tlačené šířky stěny. Přesto je žebro poměrně hustě vyztuženo profily $\Phi 50\text{mm}$, což vede na zvážení zvětšení tloušťky žebra případně změny tvaru na I profil. Výztuž byla navržena pomocí programu Idea Statica Detail pro mezní stav únosnosti i použitelnosti. Pro návrh byly zvoleny tři řezy po výšce žebra. Na základě tohoto předběžného návrhu hlavní nosné výztuže je součástí práce schéma vyztužení žebra.

7.4 Porovnání variant

V samotném závěru byla varianta porovnána s původním řešením stěn, a to se zaměřením na úsporu betonu, která byla vyčíslena přibližně na třetinu, toto mělo za následek uvážení možného vyplavání komory, toto se s přitížením zemním tlakem nepotvrdilo. V případě uvážení odkopané prázdné komory s hladinou spodní vody na 118 m n.m. se situace blíží rovnovážného stavu v charakteristických hodnotách se součiniteli pak daná situace nevyhovuje.

7.5 Materiálové charakteristiky alternativního řešení

7.5.1 Beton

Beton C35/45

Materiálové charakteristiky: dle ČSN EN 1992-1-1

Tabulka 3.1

$$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cc} = 1,0$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \alpha_{cc} = \frac{35}{1,5} \cdot 1,0 = 23,33 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$$

$$E_{cm} = 34 \text{ GPa}$$

7.5.2 Ocel

Ocel B550B

$$f_{yk} = 550 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{550}{1,15} = 478,26 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200,0 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{478,26}{200} = 2,39 \text{ ‰}$$

8 Závěr

V bakalářské práci bylo provedeno statické posouzení příčného řezu pravé plavební komory na základě nového výpočtu zatížení. Pro výpočet bylo nutné nastudovat původní dokumentaci jak z hlediska tvaru konstrukce, jejího vyztužení, tak z hlediska přístupu výpočtu dle tehdejších norem a použitých materiálů. Komora byla nově posouzena z hlediska mezních, kde se ukázaly odlišnosti od původního návrhu způsobující nevyhovující situace. Pro posouzení bylo použito dvou metod, konkrétně lineární model v programu SCIA Engineer a následné posudky ve vybraných řezech komory formou interakčních diagramů. Druhou metodou byla nelineární analýza vyztuženého modelu hlavní nosnou výztuží dle původní výkresové dokumentace pomocí programu Idea StatiCa Detail.

Při srovnání obou metod se ukázalo, že hlavním problémem je kombinace plné odkopané komory, zejména pro dnovou desku. Tato kombinace byla vyhodnocena jako nepravděpodobná, respektive nemožná vzhledem k velikosti a významu stavby.

Další částí této práce bylo navržení alternativního řešení stěn komory, vybrána byla varianta se žebrovými stěnami. Pro tuto alternativu bylo proveden výpočet s ověřením dimenzovatelnosti a předběžným návrhem hlavní výztuže žebra a stěny pro maximální vnitřní síly. Návrh neslouží jako finální podoba, spíše jako ověření jiné možnosti řešení, bez ohledu na vnitřní vybavení komory a návaznost na dnovou desku, která by byla extrémně lokálně namáhána v místě žeber.

Přílohami této práce jsou podklady použité při zpracování původního řešení komory, výkresy výztuže vytažené pro vyztužení nelineárního modelu, výkres tvaru stávajícího stavu, dále výkres tvaru alternativní varianty stěn pro jeden dilatační celek a schémata výztuže žebra a stěny. V neposlední řadě také statický výpočet.

V úvodu je taktéž v souhrnu popsána problematika plavebních komor a jejich typických příčných řezů. Taktéž zkrácené seznámení s řešenou plavební komorou, jež je součástí Vodního díla Gabčíkovo.

9 Použité zdroje

Použitá literatura

- [1] MEDŘICKÝ, Vladimír a Petr VALENTA. *Vodní cesty: navrhování plavebních komor*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06443-6.
- [2] ZICH, Miloš. *Příklady posouzení betonových prvků dle eurokódů*. Praha: Dashöfer, 2010. ISBN 978-80-86897-38-7.
- [3] ZICH, Miloš a Zdeněk BAŽANT. *Plošné betonové konstrukce, nádrže a zásobníky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-693-5

Normy

- [4] ČSN 73 0037. Zemní tlak na stavební konstrukce. Český normalizační institut, listopad 1990.
- [5] ČSN EN 1990 (730002). Zásady navrhování konstrukcí. Český normalizační institut, březen 2004.
- [6] ČSN EN 1991-1-1 (730035). Eurokód 1: Zatížení konstrukcí, část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Český normalizační institut, duben 2004.
- [7] ČSN EN 1991-1-4 (730035). Eurokód 1: Zatížení konstrukcí, Část 4: Zatížení zásobníků a nádrží. Český normalizační institut, leden 2008.
- [8] ČSN EN 1992-1-1 (731201). Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, listopad 2006.
- [9] ČSN EN 1992-3 (731201). Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 3: Nádrže na kapaliny a zásobníky. Český normalizační institut, leden 2007.

Webové stránky

- [10] Vodohospodárska výstavba. *SVD Gabčíkovo – Nagymaros* [online]. Dostupné z: <http://www.vvb.sk/cms/index.php?page=svd-gabcikovo-nagymaros>
- [11] Časopis stavebnictví. *Modernizace plavebních komor Vodního díla Gabčíkovo* [online]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-modernizace-plavebnich-komor-vodniho-dila-gabcikovo.html>
- [12] VODNÍ CESTY A PLAVBA (příprava přednášek) - ADOC.PUB [online].[cit. 26.05.2022]. Dostupné z: <https://adoc.pub/vodni-cesty-a-plavba-piprava-pednaek.html>

- [13] ČESKOMORAVSKÝ BETON. *Příručka technologa – Beton*. [online]. Českomoravský beton, a.s. 2012 [cit. 26.05.2022]. Dostupné z: <https://www.transportbeton.cz/aktualizovana-prirucka-technologa-beton.html>
- [14] Drahomir. *Betonářská výztuž* [online]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/drahomir/Pomucky/Char_mat/Vyzt_CSN.pdf
- [15] Vodní díla. *O projektu* [online]. [cit. 26.05.2022]. Dostupné z: <https://www.lvvc.cz/databaze.php>
- [16] Plavební komora Staré Město – Bařův kanál. *Baták.cz - Bařův kanál* [online]. [cit. 26.05.2022]. Dostupné z: <https://www.batak.cz/plavebni-komory-batuv-kanal/145-plavebni-komora-stare-mesto>
- [17] Geotechnický software GEO5 Fine [online]. [cit. 26.05.2022]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/geotechnicky-software/>

Projektová dokumentace

- [18] HYDROCONSULT BRATISLAVA. *SVD Gabčíkovo – Nagymaros – Vodné dielo Gabčíkovo*. Bratislava 1985-1987
- [19] Podklady dwg poskytnuté od firmy Aquatis (Projekt Inovácie a modernizácie plavebných komôr pre zvýšenie bezpečnosti a intenzity vodnej dopravy na vodnom diele Gabčíkovo, 2019)

10 Seznam obrázků

- Obr. 1 Schéma plavební komory [1]
- Obr. 2 Komora se zpevněnými svahy vodního toku [12]
- Obr. 3 Plavební komory s tížnými stěnami bez dnové desky [1]
- Obr. 4 Plavební komory Vrané nad Vltavou [15]
- Obr. 5 Plavební komora Staré Město Bařův kanál [16]
- Obr. 6 Plavební komory s oddílatovanou dnovou deskou [12]
- Obr. 7 Plavební komora Brandýs nad Labem [15]
- Obr. 8 Plavební komory polorámového typu [12]
- Obr. 9 Plavební komora Pardubice [15]
- Obr. 10 Stěna plavební komory na vysokém pilotovém roště [12]
- Obr. 11 Konstrukce stěny z ocelových štetovnic [1]
- Obr. 12 Komory z prefabrikovaných dílců stěn a dna [1]
- Obr. 13 Pohled do plavební komory VD Gabčíkovo 1)
- Obr. 14 Dno komory – schéma
- Obr. 15 Dno plavební komory se šterbinami pro plnění a prázdnění 1)
- Obr. 16 Pohled do ocelové trubky průměru 1,5m z prostředního kanálu 1)
- Obr. 17 Pohled na stěnu plavební komory 1)
- Obr. 18 Dolní vrata komory s mostovkou komunikace 1)
- Obr. 19 Horní segmentová vrata 1)
- Obr. 20 Výsek příčného řezu pravé plavební komory
- Obr. 21 Srovnávací tabulka pevnostních tříd betonů [13]
- Obr. 22 Betonářská výztuž 10 425 V [14]

Poznámka:

- 1) Obrázky jsou z vlastní fotogalerie, pořízené během exkurze dne 9.3.2022

11 Použité programy

AutoCAD 2018 Studentská verze – Autodesk

SCIA Engineer 21.1, 64bit – SCIA CZ s.r.o. Brno

IDEA StatiCa 21.0 – IDEA StatiCa s.r.o.

Microsoft Word

Microsoft Excel

12 Seznam příloh

P1) Použité podklady

P2) Statický výpočet

P3) Výkresová dokumentace