FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla

Design of the sealing shield of the ship´s hoist track

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Tomáš STANĚK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Češpíro, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Staněk** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **491188**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla

Název bakalářské práce anglicky:

Design of the sealing shield of the ship's hoist track

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte konstrukci a pohon posuvného těsnicího štítu v horní stanici dráhy šikmého lodního zdvihadla. Štít vyrovnává kolísání hladiny ve vjezdu do žlabu zdvihadla. Součástí řešení je vyvážení štítu, jeho utěsnění a návrh sklopných vrat.

Seznam doporučené literatury:

Švec, V.: Části a mechanismy strojů – Spoje a části spojovací . ČVUT Praha, 1997
Švec, V.: Části a mechanismy strojů – Mechanické převody . ČVUT Praha, 1999
Jančík,L., Zýma, J.: Části a mechanismy strojů. ČVUT Praha 2004

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Češpíro, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **06.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Češpíro, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. František Lopot, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27. 4. 2022 Datum převzetí zadání	Staněk Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Češpíra, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze, dne 3. června 2022

……

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Zdeňku Češpírovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce, jeho rady a připomínky k řešené problematice a za ochotu a trpělivost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Hoidekrovi, Ph.D. za poskytnuté informace, rady a pomoc s konstrukcí základního návrhu těsnicího štítu v předmětu Strojírenské konstruování 4, ze kterého tento projekt přerostl v bakalářskou práci. V neposlední řadě své rodině, která mě podporovala nejen při psaní této práce, ale při celém studiu.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Tomáš STANĚK
Název BP:	Návrh těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla
Anglický název:	Design of the sealing shield of the ship´ s hoist track
Rok:	2022
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Zdeněk Češpíro Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran ..... 55 počet obrázků ..... 41 počet tabulek ..... 0 počet příloh 3
Klíčová slova:	zdvihadlo, těsnicí štít, lodní výtah, loď, přehrada, přeprava lodí, konstrukce
Keywords:	lift, sealing shield, boat lift, ship, dam, ship transport, construction
Anotace:	Bakalářská práce je zaměřena na návrh konstrukce a pohonu těsnicího štítu v horní stanici dráhy šikmého lodního zdvihadla, který vyrovnává kolísání hladiny ve vjezdu do žlabu zdvihadla. Teoretická část je zaměřena na rešerši lodních zdvihadel jako takových. V praktické části je navrženo konstrukční řešení dílčích problémů, jejíž součástí je řešení vyvážení štítu, jeho utěsnění a návrh sklopných vrat.
Abstract:	The bachelor's thesis is focused on the design of the construction and drive of the sealing shield in the upper station of the slope of the inclined ship hoist, which compensates for level fluctuations at the entrance to the hoist trough. The theoretical part is focused on the search of ship hoists as such. In the practical part, a design solution of partial problems is proposed, which includes the solution of the shield balance, its sealing and the design of folding doors.

Obsah

Seznam zkratek a symbolů VII
1. Úvod 1
1.1 Cíl práce 2
2. Lodní zdvihadla 3
2.1 Popis zařízení 3
2.2 Výhody lodních zdvihadel 3
2.3 Nevýhody lodních zdvihadel 3
2.4 Přehled lodních zdvihadel 3
2.4.1 Svislá lodní zdvihadla 4
2.4.2 Šikmá lodní zdvihadla 5
2.4.3 Speciální lodní zdvihadla 8
3. Konstrukční návrh šikmého těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla 8
3.1 Návrhové výpočty reakcí při zatížení štítu hydrostatickým tlakem 9
3.1.1 Zatížení hydrostatickým tlakem 10
3.2 Spojení lodní vany s těsnicím štítem 16
3.3 Celková konstrukce šikmého těsnicího štítu 17
3.3.1 Těsnicí štít 17
3.3.2 Konstrukce vany štítu 18
3.3.3 Spojení štítu s vanou štítu 19
3.4 Návrh pojezdů šikmého těsnicího štítu 20
3.5 Vyvážení těsnicího štítu 23
3.6 Návrh pohonu šikmého těsnicího štítu 26
3.6.1 Návrh elektromotoru 27
3.6.2 Návrh převodovky 28
3.6.3 Kontrola rozběhového momentu motoru 29
3.7 Konstrukční návrh sklopných vrat 29
3.7.1 Kontrola hřídele vrat 32
3.7.2 Kontrola ložisek 36
3.8 Utěsnění štítu 37
3.8.1 Zatěsnění po obvodu štítu 37
3.8.2 Utěsnění vrat 40
4. Závěr 41
Seznam použité literatury 42
Seznam obrázků 44
Seznam příloh 45

Seznam zkratek a symbolů

$a\ [mm]$	*plavební šířka těsnicího štítu (viz obr. 9)*
$b\ [mm]$	*šířka těsnicího štítu (viz obr. 9)*
$C\ [kN]$	*dynamická únosnost ložiska*
$C_0\ [kN]$	*statická únosnost ložiska*
$Cr\ [N]$	*základní dynamická radiální únosnost*
$D\ [mm]$	*velký průměr hřídele*
$D_{kolo}\ [mm]$	*průměr pojezdového kola*
$d\ [mm]$	*malý průměr hřídele*
$d_{oz.kolo}\ [mm]$	*průměr ozubeného kola*
$e\ [mm]$	*valivé tření*
$F\ [N]$	*zatěžující síla hřídelů vrat (viz obr. 33)*
$F_{celková}\ [N]$	*celkový odpor čtyř pojezdových kol v provozním stavu*
$F_{ip}\ [N]$	*inerční síla posuvných hmot*
$F_{kolo}\ [N]$	*odpor pojezdového kola v provozním stavu*
$F_{pohon}\ [N]$	*síla pro jeden pohon*
$F_{vrata}\ [N]$	*síla hydrostatického tlaku působící na vrata (viz obr. 9)*
$F_{vrata_x}\ [N]$	*rozklad síly F_{vrata} do složky ve směru x (viz obr. 11)*
$F_{vrata_y}\ [N]$	*rozklad síly F_{vrata} do složky ve směru y (viz obr. 11)*
$F_1\ [N]$	*součet sil $F_1^{'}$ a $F_1^{''}$(viz obr. 9)*
$F_{1_x}\ [N]$	*rozklad síly F_1 do složky ve směru x (viz obr. 11)*
$F_{1_y}\ [N]$	*rozklad síly F_1 do složky ve směru y (viz obr. 11)*
$F_1^{'}\ [N]$	*přídavná síla hydrostatického tlaku působící na odskok ve vaně těsnicího štítu vlivem zatížení sloupcem vody (viz obr. 9)*
$F_1^{''}\ [N]$	*síla hydrostatického tlaku působící na odskok ve vaně těsnicího štítu (viz obr. 9)*
$F_2\ [N]$	*síla hydrostatického tlaku působící na boky čela těsnicího štítu (viz obr. 9)*
$F_{2_x}\ [N]$	*rozklad síly F_2 do složky ve směru x (viz obr. 11)*
$F_{2_y}\ [N]$	*rozklad síly F_2 do složky ve směru y (viz obr. 11)*
$F_3\ [N]$	*součet sil $F_3^{'}$ a $F_3^{''}$ (viz obr. 9)*
$F_{3_x}\ [N]$	*rozklad síly F_3 do složky ve směru x (viz obr. 11)*
$F_{3_y}\ [N]$	*rozklad síly F_3 do složky ve směru y (viz obr. 11)*
$F_3^{'}\ [N]$	*přídavná síla hydrostatického tlaku působící na čelo těsnicího štítu pod vraty vlivem zatížení sloupcem vody (viz obr. 9)*
$F_3^{''}\ [N]$	*síla od hydrostatického tlaku působící na čelo těsnicího štítu pod vraty (viz obr. 9)*

F_4 $[N]$	*součet sil $F_4^{'}$ a $F_4^{''}$ (viz obr. 9)*
$F_4^{'}$ $[N]$	*přídavná síla hydrostatického tlaku působící na spodek těsnicího štítu (viz obr.9)*
$F_4^{''}$ $[N]$	*síla od hydrostatického tlaku působící na spodek těsnicího štítu (viz obr.9)*
$f_{č}$ $[1]$	*čepové tření valivé*
G $[N]$	*tíha těsnicího štítu (viz obr.9)*
G_{voda_1} $[N]$	*tíha vody ve vaně štítu (viz obr.9)*
$G_{voda_{1_x}}$ $[N]$	*rozklad tíhy vody ve vaně G_{voda_1} do složky ve směru x (viz obr. 11)*
$G_{voda_{1_y}}$ $[N]$	*rozklad tíhy vody ve vaně G_{voda_1} do složky ve směru y (viz obr.11)*
G_{voda_2} $[N]$	*tíha vody ve vaně štítu (viz obr.9)*
$G_{voda_{2_x}}$ $[N]$	*rozklad tíhy vody ve vaně G_{voda_2} do složky ve směru x (viz obr.11)*
$G_{voda_{2_y}}$ $[N]$	*rozklad tíhy vody ve vaně G_{voda_2} do složky ve směru y (viz obr.11)*
G_x $[N]$	*rozklad tíhy těsnicího štítu G do složky ve směru x (viz obr.11)*
G_y $[N]$	*rozklad tíhy těsnicího štítu G do složky ve směru y (viz obr.11)*
g $[m \cdot s^{-2}]$	*střední hodnota gravitačního zrychlení*
h_{vrata} $[mm]$	*výška hladiny vody (viz obr.9)*
h_1 $[mm]$	*výška hladiny vody (viz obr.9)*
h_2 $[mm]$	*výška hladiny vody (viz obr.9)*
h_3 $[mm]$	*výška hladiny vody (viz obr.10)*
i $[1]$	*celkový převod*
k $[1]$	*bezpečnost*
L $[hod]$	*základní trvanlivost ložiska*
L_G $[mm]$	*vzdálenost těžiště těsnicího štítu od čela štítu (viz obr.9)*
L_s $[mm]$	*vzdálenost síly S od spodního okraje těsnicího štítu (viz obr.9)*
L_{voda_1} $[mm]$	*vzdálenost síly G_{voda_1} od čela štítu (viz obr.9)*
L_{voda_2} $[mm]$	*vzdálenost síly G_{voda_2} od čela štítu (viz obr.9)*
L_{vrata} $[mm]$	*vzdálenost síly F_{vrata} ode dna vany těsnicího štítu (viz obr.9)*
L_1 $[mm]$	*vzdálenost síly F_1 ode dna vany těsnicího štítu (viz obr.9)*
$L_1^{'}$ $[mm]$	*vzdálenost síly $F_1^{'}$ ode dna vany těsnicího štítu (viz obr.9)*
$L_1^{''}$ $[mm]$	*vzdálenost síly $F_1^{''}$ ode dna vany těsnicího štítu (viz obr.9)*
L_2 $[mm]$	*vzdálenost síly F_2 ode dna vany těsnicího štítu (viz obr.9)*
L_3 $[mm]$	*vzdálenost síly F_3 od spodního okraje těsnicího štítu (viz obr.9)*

$L_3^{'}$ $[mm]$	*vzdálenost síly $F_3^{'}$ od spodního okraje těsnicího štítu (viz obr.9)*
$L_3^{''}$ $[mm]$	*vzdálenost síly $F_3^{''}$ od spodního okraje těsnicího štítu (viz obr.9)*
L_4 $[mm]$	*vzdálenost síly F_4 od spodního zkoseného okraje těsnicího štítu (viz obr.9)*
$L_4^{'}$ $[mm]$	*vzdálenost síly $F_4^{'}$ od spodního zkoseného okraje těsnicího štítu (viz obr.9)*
$L_4^{''}$ $[mm]$	*vzdálenost síly $F_4^{''}$ od spodního okraje zkoseného těsnicího štítu (viz obr.9)*
l $[mm]$	*vzdálenost těžiště vrat a vody od osy hřídele (viz obr. 32)*
$l_{drážkování}$ $[mm]$	*aktivní délka drážkování*
l_{F_1} $[mm]$	*vzdálenost síly F_1 od bodu A (viz obr.9)*
l_{F_2} $[mm]$	*vzdálenost síly F_2 od bodu A (viz obr.9)*
l_{F_3} $[mm]$	*vzdálenost síly F_3 od bodu A (viz obr.9)*
l_{F_4} $[mm]$	*vzdálenost síly F_4 od bodu A (viz obr.9)*
l_G $[mm]$	*vzdálenost tíhy G těsnicího štítu od bodu A (viz obr.9)*
l_{R_1} $[mm]$	*vzdálenost reakce R_1 od bodu A (viz obr.9)*
l_{R_2} $[mm]$	*vzdálenost reakce R_2 od bodu A (viz obr.9)*
l_S $[mm]$	*vzdálenost síly S od bodu A (viz obr.9)*
l_{voda_1} $[mm]$	*vzdálenost tíhy vody G_{voda_1} ve vaně štítu od bodu A (viz obr.9)*
l_{voda_2} $[mm]$	*vzdálenost tíhy vody G_{voda_2} ve vaně štítu od bodu A (viz obr.9)*
l_1 $[mm]$	*rozměr vany štítu (viz obr.9)*
l_2 $[mm]$	*rozměr vany štítu (viz obr.9)*
M $[N \cdot m]$	*jmenovitý moment*
M_k $[N \cdot mm]$	*kroutící moment*
$M_{Nmotoru}$	*spouštěcí moment motoru*
$M_{o_{max}}$ $[N \cdot mm]$	*maximální ohybový moment*
$m_{protiz.\ celk.}$ $[kg]$	*hmotnost všech protizávaží*
$m_{protizávaží}$ $[kg]$	*hmotnost jednoho protizávaží*
M_{roz} $[N \cdot m]$	*celkový rozběhový moment*
$m_{těsnicí\ štít}$ $[kg]$	*uvažovaná pětinová hmotnost 3D modelu těsnicího štítu*
m_{vrata} $[kg]$	*hmotnost vrat*
m_{3D} $[kg]$	*hmotnost 3D modelu těsnicího štítu*
n_v $[ot/min]$	*výstupní otáčky*
P $[W]$	*výkon motoru*
p $[MPa]$	*tlak v drážkování*
$p_{čárový\ styk}$ $[1]$	*mocnitel pro ložiska s čárovým stykem*

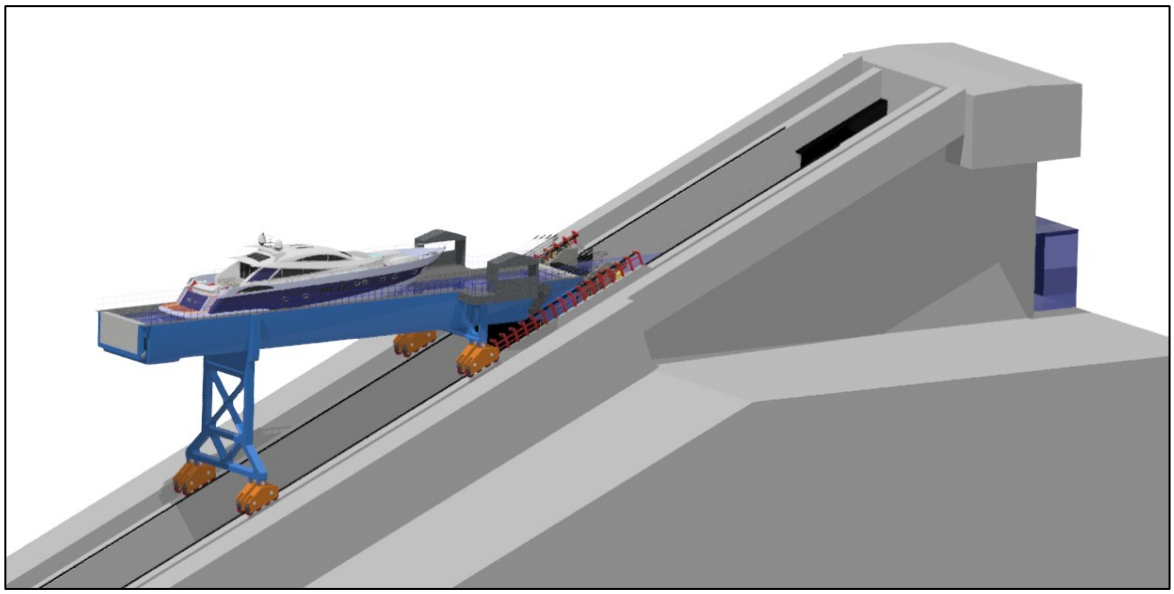
$p_D\ [MPa]$	*dovolený tlak pro drážkování*
$p_i\ [MPa]$	*maximální vnitřní tlak uvnitř těsnění Airseal udávaný výrobcem Trelleborg*
$P_r\ [N]$	*dynamické ekvivalentní radiální zatížení*
$p_1\ [MPa]$	*maximální hydrostatický tlak*
$p_2 [MPa]$	*úroveň atmosférického tlaku pro výpočet tlakového rozdílu*
$p_3\ [MPa]$	*tlak uvnitř nafukovacího těsnění*
$\Delta p\ [MPa]$	*tlakový diferenciál podél těsnění*
$R_e\ [MPa]$	*mez kluzu pro ocel*
$R_1\ [N]$	*síla působící na přední pojezdy*
$R_2\ [N]$	*síla působící na zadní pojezdy*
$r_č\ [mm]$	*poloměr čepu*
$S\ [N]$	*síla protizávaží*
$S_s\ [mm^2]$	*střižná plocha*
$t_a\ [s]$	*čas za který štít dosáhne požadované rychlosti posuvu*
$v_p\ [\ m \cdot min^{-1}]$	*rychlost posuvu štítu*
$W_o\ [mm^3]$	*modul pružnosti v ohybu*
$W_k\ [mm^3]$	*průřezový modul v kroucení*
$z\ [1]$	*počet zubů*
$\alpha\ [°]$	*úhel sklonu dráhy*
$\eta\ [1]$	*účinnost převodu*
κ	*koeficient vlivu ostatních rotujících hmot soustavy*
$\rho\ [kg \cdot m^{-3}]$	*hustota vody*
$\sigma_o\ [N \cdot mm^{-2}]$	*napětí v ohybu*
$\sigma_{red}\ [N \cdot mm^{-2}]$	*redukované napětí*
$\sigma_K\ [N \cdot mm^{-2}]$	*mezní napětí*
$\tau\ [N \cdot mm^{-2}]$	*výsledná složka smykových napětí*
$\tau_k\ [N \cdot mm^{-2}]$	*napětí v krutu*
$\tau_s\ [N \cdot mm^{-2}]$	*napětí ve střihu*
$x\ [1]$	*odpor s přímkovým dotykem*
$\psi\ [1]$	*součinitel nerovnoměrnosti zatížení drážek*

1. Úvod

Vodní doprava patří k nejstarším druhům dopravy. Rozdělujeme ji podle různých hledisek na vodní dopravu osob a dopravu nákladní nebo na dopravu vnitrozemskou či námořní. Je zajišťována plavidly po vodních tocích, kterými jsou zejména řeky, kanály a průplavy. Stejně tak vodní doprava umožňuje přepravu a dopravu v mořích nebo oceánech. Také se s ní můžeme setkat na přírodních i umělých jezerech. Význam lodní dopravy spočívá v přepravě osob nebo objemných nákladů, u kterých by byl jiný druh přepravy jen stěží realizovatelný. Vodní toky jsou tak jednou z hlavních tepen dopravní infrastruktury. S rozvojem techniky a snahou lidstva využít nejenom potenciál síly vody, ale také se před touto silou ochránit, docházelo a dochází k zásahům do původních toků. S výstavbou jezů, přehrad a dalších vodohospodářských staveb, které slouží k regulaci toku, ochraně před povodněmi, k zadržování vody pro výrobu elektrické energie či jako zásobárna pitné vody, tak došlo k vybudování překážek na tocích, které brání jejich splavnosti. Pro uskutečnění lodní dopravy po vodních tocích je nutné tyto překážky překonat. V případě potřeby překonání malého spádu jsou pro tento účel stavěny plavební komory se zdymadly. S rostoucím spádem je zapotřebí použít více těchto plavebních komor za sebou, a tak vznikají kaskády. Pro překonání velkých spádů vodních hladin, které jsou obzvláště na přehradách, není použití kaskády zdaleka efektivním způsobem. K překonání těchto spádů jsou tak stavěna lodní zdvihadla. Použití zdvihadla je však v porovnání s plavební komorou konstrukčně značně složité a finančně velmi nákladné. Z tohoto důvodu bylo doposud na celém světě vystavěno lodních zdvihadel jen velmi málo. V České republice měla být výstavba lodního zdvihadla realizována na Vodní nádrži Orlík. K dokončení tohoto projektu však doposud nedošlo.

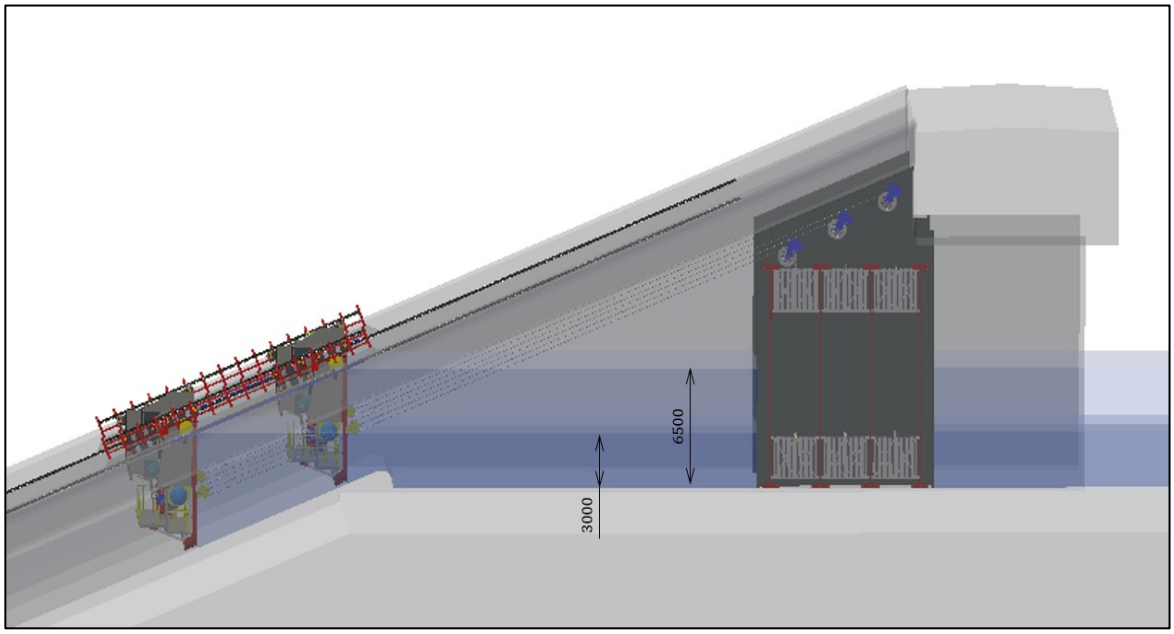
1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je konstrukční návrh šikmého těsnicího štítu dráhy nedokončeného lodního zdvihadla Orlické přehrady, ke kterému je dopravována loď ve vaně napuštěné vodou (viz obr. 1). Hladina této vody ve vaně sahá z důvodu vyvážení vždy do stejné úrovně.



Obrázek 1.: Vana s lodí přiražená na těsnicí štít.

Těsnící štít má být navržen pro vyrovnání kolísající hladiny vody v přehradě tak, aby rozdíl hladiny pohyblivé vany s lodí po přiražení k těsnícímu štítu a hladiny vody v přehradě byl zanedbatelný. Vzhledem ke stavu vody v přehradě musí být těsnící štít schopen pracovat v rozmezí hladin od 3000 do $6500\ mm$ ode dna dráhy zdvihadla (viz obr. 2).



Obrázek 2.: Pracovní rozmezí hladin vody.

2. Lodní zdvihadla

2.1 Popis zařízení

Lodní zdvihadla jsou zařízení sloužící k přepravě lodí pro překonání spádu mezi dvěma různě položenými úseky vodní cesty. K jejich uplatnění dochází zejména v případech, kdy je výstavba běžné plavební komory se zdymadlem nebo kaskádou více zdymadel z důvodu velkého převýšení velice obtížně realizovatelná. V současné době se lodní zdvihadla používají k překonávání spádů vyšších než $30\,m$. Nejčastěji se s použitím lodních zdvihadel setkáme na přehradách, kdy je zapotřebí překonat velký rozdíl vodních hladin mezi přehradou a řekou u její výpusti. Doposud největší překonaný spád $101\,m$ byl překonán šikmým zdvihadlem na přehradě Krasnojarsk, která se nachází na řece Jenisej. Největší svislé zdvihadlo se spádem $73{,}8\,m$ se donedávna nacházelo na průplavu Canal du Centre v Belgii u Strépy-Thieu. [1] Dnes se prvenstvím největšího zdvihadla na světě pyšní zdvihadlo na největší přehradě světa Tři soutěsky, které překonává spád $113\,m$. [2]

2.2 Výhody lodních zdvihadel

- možnost překonání větších spádů
- větší rychlost při překonání spádů
- vysoká dopravní výkonnost
- zanedbatelná spotřeba vody
- nedochází ke kolísání hladin v přilehlých zdržích

2.3 Nevýhody lodních zdvihadel

- konstrukční složitost a vysoké nároky na kvalitu provedení
- větší náchylnost k poškození
- vyšší nároky na obsluhu a údržbu
- omezené rozměry přepravovaných lodí
- nutnost rozpojování lodních souprav z důvodu možnosti proplouvání pouze jednotlivých lodí

2.4 Přehled lodních zdvihadel

Lodní zdvihadla je možné dělit podle směru a způsobu přepravy žlabu s lodí na svislá, šikmá a speciální. Tyto jednotlivé kategorie je následně možné rozčlenit podle způsobu provedení na:

- svislá lodní zdvihadla
  - pístová
  - plováková
  - s protizávažím
- šikmá lodní zdvihadla
  - s příčně uloženým žlabem
  - s podélně uloženým žlabem
- speciální lodní zdvihadla [1]

2.4.1 Svislá lodní zdvihadla

Svislá lodní zdvihadla fungují na principu překonávání spádů pomocí lodního žlabu, který se pohybuje ve svislém směru mezi jednotlivými zdržemi. Tento typ zdvihadel je možné dále rozdělit do jednotlivých podkategorií podle způsobu konstrukce. [1]

2.4.1.1 Pístová zdvihadla

Konstrukce pístového zdvihadla vychází z hydraulického lisu. Zdvihadlo je složeno ze dvou částí, z nichž každá má svůj lodní žlab podepřený pístem. Jejich pohyb je realizován ve svislých vodotěsných válcích uložených v šachtách naplněných vodou. Na horních koncích jsou válce zatěsněny a spojeny potrubím opatřeným uzávěrem regulujícím rychlost pohybu žlabů. Pohyb zařízení je vyvolán porušením rovnováhy mezi oběma žlaby připuštěním malé vrstvy vody do horního žlabu z horní zdrže. Tato změna vyvodí přídavnou sílu a žlab začne klesat. Rychlost pohybu žlabů je regulována uzávěrem na spojovacím potrubí. [1]

Příkladem pístového lodního zdvihadla může být Andertonské lodní zdvihadlo (viz obr. 3).

Obrázek 3.: Andertonský lodní výtah. [19]

2.4.1.2 Plováková zdvihadla

Plováková zdvihadla vychází z principu Archimedova zákona. Lodní žlab je umístěn na velkých plovácích, ke kterým je uchycen pomocí svislých ocelový podpěr, jejichž výška přibližně odpovídá překonávanému spádu. Tyto plováky vykonávají svislý pohyb v šachtách naplněných vodou a v každé poloze vyvolávají konstantní vztlak schopný vyvážit tíhu žlabu napuštěného vodou. Pro pohyb žlabu tak stačí působení malé síly potřebné k překonání odporů proti pohybu. [1]

2.4.1.3 Zdvihadla s protizávažím

Tento typ zdvihadel nevyžaduje budování hlubokých šachet, čímž je vhodný pro překonávání vyšších spádů. Jejich konstrukce spočívá ve vyvážení tíhy žlabu s vodou protizávažími. Tato protizávaží jsou zavěšena na lanech, která jsou vedena přes kola uložená ve vodící portálové konstrukci. Žlab naplněný vodou je s protizávažím v labilní rovnováze. K uvedení žlabu do pohybu tak stačí relativně malá pohonná síla, která je zajištěná buď pomocí hřídelí zapadajících do ozubnic v bočních pilířích, nebo pomocí vřetenových tyčí, po nichž se pohybují vřetenové matice spojené se žlabem. Při pohonu, kdy hřídele zapadají do ozubnic, jsou elektromotory umístěny na žlabu. U pohonu pomocí vřetenových tyčí se elektromotory nacházejí na vodící konstrukci. [1]

Příkladem svislého zdvihadla může být lodní zdvihadlo na Canal du Centre mezi městy Strépy a Thieu v Belgii (viz obr. 4), které je považováno za jeden z největších lodních výtahů na světě. Toto zdvihadlo je schopné překonávat výškový rozdíl $73{,}15\ m$. [3]

Suverénně největším zdvihadlem na světě je však lodní zdvihadlo na přehradě Tři Soutěsky (viz obr. 5), které je možné s loděmi o hmotnosti až $3\,000\ t$ překonávat spád $113\ m$. Tento spád je při přepravě lodí zdvihadlo schopno překonat za pouhých 30 až 40 minut, což je alternativou čtyřhodinové cesty pětistupňovou kaskádou plavebních komor. Zdvihadlo na přehradě Tři Soutěsky je navíc schopné pracovat i při kolísání hladiny vody až o 12 metrů v dolní vodě a až o 30 metrů v horní vodě. [2]

Obrázek 4.: Lodní zdvihadlo Strépy – Thieu. [14]

Obrázek 5.: Lodní zdvihadlo na přehradě Tři soutěsky. [15]

2.4.2 Šikmá lodní zdvihadla

Šikmá lodní zdvihadla označována jako lodní železnice, jsou schopna překonávat v podstatě libovolné spády. Je však nutné, aby terén v jejich trase byl stabilní a měl konstantní sklon. Základem šikmého lodního zdvihadla je žlab naplněný vodou nebo plošina pro dopravu na sucho. Pohyb žlabu nebo plošiny od jedné zdrže ke druhé se realizuje prostřednictvím kolových podvozků po kolejové dráze. Žlaby s vodou, popřípadě plošiny, jsou mechanicky vyvážené protizávažím, které je zavěšeno na druhém konci pohonného lana, a pohybují se po nakloněné dráze pod úrovní podvozků kolejové dráhy. Pohybové

mechanismy tak překonávají pouze valivé a čepové tření v podvozcích a ztráty v převodech. Podle umístění žlabu nebo plošiny vzhledem k ose kolejové dráhy rozlišujeme dva typy šikmých zdvihadel, a to zdvihadla s příčně a podélně uloženým žlabem. [1]

2.4.2.1 Zdvihadla s příčně uloženým žlabem

Použití tohoto typu je vhodné pro překonání velkého spádu vytvořeného vyšší strmou terénní překážkou. Trasa vodní cesty je vedena po vrstevnicích a vzniklý spád mezi nimi se překonává pomocí příčně situované kolejové dráhy. Po kolejové dráze je na podvozku dopravován žlab naplněný vodou uložený příčně ke směru pohybu. Dráha lodního žlabu má zpravidla relativně velký sklon a k překonání jejího spádu je potřeba menší délka kolejové dráhy. Šířka kolejové dráhy je však podstatně větší. Výhodou tohoto řešení jsou malé rozkyvy hladiny ve žlabu při jeho rozjezdu a brždění, které vyvolávají velmi malé síly v úvazných lanech přepravované lodě. Při proměnných hladinách ve zdržích je vždy před vyplutím lodi nutné vyrovnání příslušné hladiny s hladinou ve vaně. V případě malých rozdílů mezi hladinami je možné docílit tohoto vyrovnání pomocí obtokových kanálů. Pro vyrovnání velkého rozkyvu hladin jsou svislými hydromotory nastavovány výškové polohy žlabu zavěšeného na rámových konstrukcích. Pohon příčně uloženého žlabu je zajištěn tažnými lany vedoucími přes pohonné bubny k protizávaží. Tato protizávaží se pohybují po speciálních kolejích mezi kolejemi žlabu. V důsledku vyvážení žlabu protizávažím tak stačí pro dimenzování motorů uvažovat pouze překonání odporů třením. [1]

Mezi šikmá zdvihadla je možné zařadit například lodní zdvihadlo Saint-Louis-Arzviller na Canal de la Marne au Rhin (viz obr. 6). Toto zdvihadlo je schopné po dráze se sklonem 22° přepravovat plavidla rychlostí $0{,}6\ m/s$ do výšky $44{,}5\ m$. Jeho příčný žlab je vyvážen dvěma 450 tunovými betonovými protizávažími, která jsou umístěna na vozících v dráze pod žlabem. [4]

Obrázek 6.: Šikmé lodní zdvihadlo Arzviller s příčně uloženým žlabem. [17]

2.4.2.2 Zdvihadla s podélně uloženým žlabem

Zdvihadla s podélně uloženým žlabem mají kolejovou dráhu orientovanou ve směru osy plavební dráhy přilehlých zdrží. Lodní žlab je uložen na masivním podvozku s velkým počtem nosných kol pojíždějících po kolejnicích, na která jsou upevněna vodícími kladkami. Pohyb je zajištěn tažnými lany s protizávažím nebo vlastním pohonem, který přenáší výkon na ozubená kola pohybující se po bočních ozubnicích. [1]

Příkladem šikmého lodního zdvihadla s podélně uloženým žlabem je zdvihadlo na řece Jenisej v ruském městě Krasnojarsk (viz obr. 7).

Obrázek 7.: Krasnojarské šikmé lodní zdvihadlo s podélně uloženým žlabem. [16]

Použití tohoto typu lodního zdvihadla bylo plánováno při stavbě Orlické přehrady v České republice. Při výstavbě přehrady byla vybudována celá stavební část a ze strojní části byly nainstalovány pouze kolejové a ozubnicové dráhy. Dostavba však byla stornovaná a zdvihadlo je do dnešní doby stále nedokončené. Původní návrh je určen pro přepravu lodí o hmotnosti až $300\ t$, přičemž dochází k překonání spádu $71\ m$ se sklonem dráhy $22°$.

A právě konstrukční návrh a řešení posuvného těsnícího štítu v horní stanici dráhy nedokončeného lodního zdvihadla Orlické přehrady je předmětem této bakalářské práce. [1]

2.4.3 Speciální lodní zdvihadla

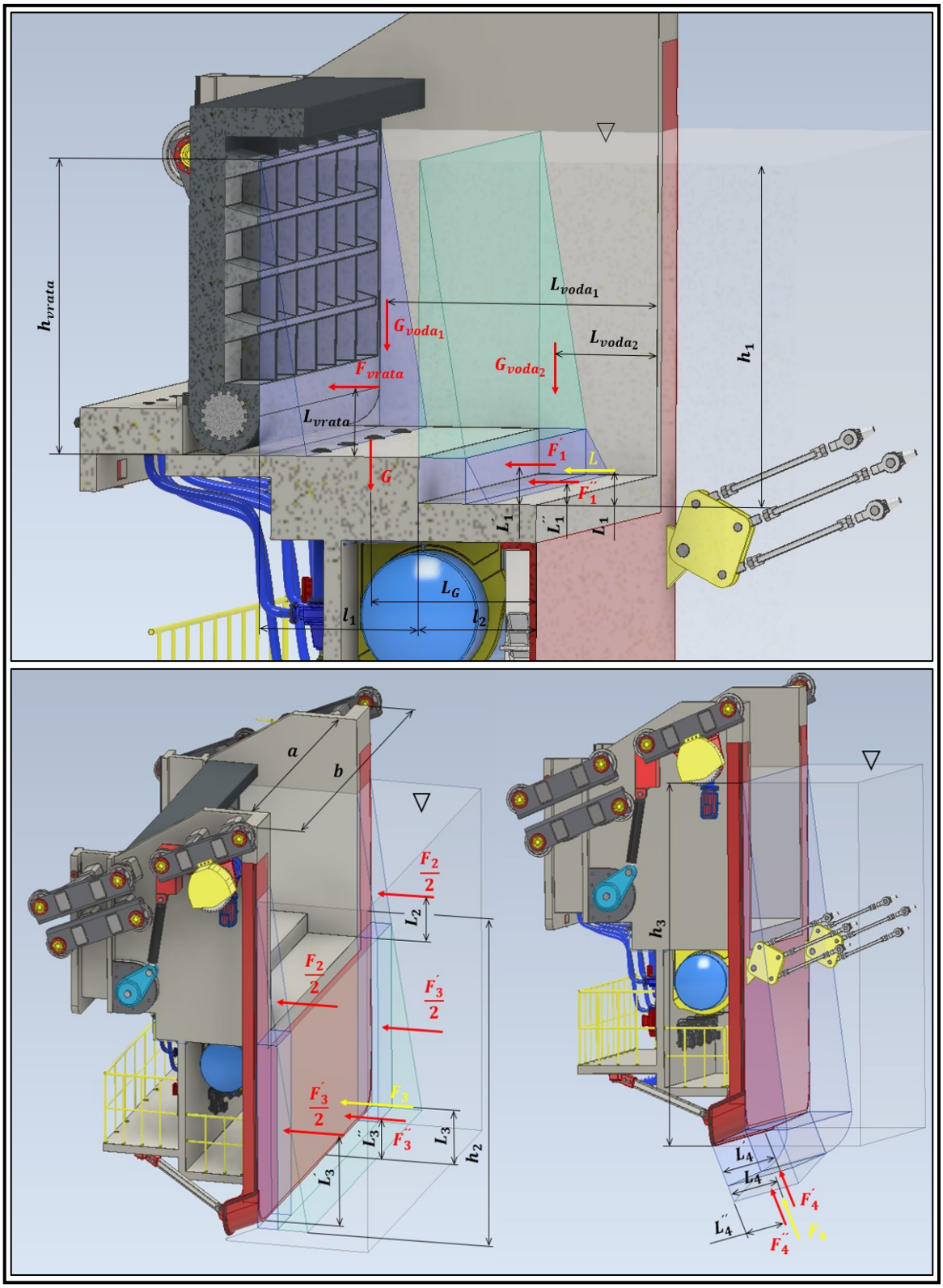
Tato kategorie lodních zdvihadel nevychází z klasického konstrukčního řešení popsaného u předešlých typů zdvihadel. K překonání spádu je použito ojedinělé řešení uzpůsobené daným požadavkům. Za speciální lodní zdvihadlo lze považovat rotační zdvihadlo Falkirk Wheel (viz obr. 8), které překonává výškový rozdíl $24\,m$. Lodní zdvihadlo Falkirk Wheel je tvořeno ze dvou van o kapacitách 600 tun vody, které jsou umístěny na koncích mohutného rotoru. Princip fungování je založen na platnosti Archimedova zákona, kdy hmotnost vody vytlačené lodí závisí na hmotnosti lodi. Udržováním hladin vody v jednotlivých vanách na stejné úrovni je tak docíleno vyvážení obou van. Pro pohon celého zařízení tak stačí relativně slabý motor, který otáčí rotorem s nádržemi o $180°$, z nichž jedna vana stoupá vzhůru, zatímco druhá klesá. [5]

Obrázek 8.: Rotační lodní zdvihadlo Falkirk Wheel. [18]

3. Konstrukční návrh šikmého těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla

Těsnicí štít má být navržen pro nedokončenou dráhu lodního zdvihadla na Orlické přehradě. Konstrukční řešení tak vychází z rozměrů vystavěné dráhy lodního žlabu a podmínek pro vyrovnání již zmiňované kolísající hladiny vody v přehradě v rozmezí od $3\,000$ až do $6\,500\,mm$ ode dna dráhy zdvihadla (viz obr. 2). Štít tak musí být pohyblivý, aby byl schopen vyrovnat požadované poklesy vody. Současně by měly být při konstrukčním návrhu dosaženy co možná největší plavební rozměry pro možnost přepravy větších lodí.

3.1 Návrhové výpočty reakcí při zatížení štítu hydrostatickým tlakem



Obrázek 9.: Schématické znázornění sil působících na těsnicí štít a dané rozměry.

V důsledku zatížení štítu hydrostatickým tlakem je vycházeno v následujících výpočtech reakcí z obr. 9 a z obr. 10. Na obr. 9 jsou vyznačeny jednotlivé síly od hydrostatického tlaku, síly od tíhy vody, tíhy štítu a jejich vzdálenosti od zvolených základen. Dále jsou na obr. 9 a obr. 10 vyznačeny rozměry šikmého těsnicího štítu s vanou a výšky hladin vody pro potřebné výpočty.

3.1.1 Zatížení hydrostatickým tlakem

Rozměry použité ve výpočtech:

$a = 6\,000\ mm$
$b = 7\,890\ mm$
$h_{vrata} = 2\,340\ mm$
$h_1 = 2\,700\ mm$
$h_2 = 6\,170\ mm$
$h_3 = 6\,465\ mm$
$\alpha = 22°$
$l_1 = 1\,370\ mm$
$l_2 = 1\,000\ mm$
$L_G = 1\,847\ mm$

Pro následující výpočty jsou uvažovány dané konstanty:

- hustota vody $\rho = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$
- střední hodnota gravitačního zrychlení $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$

3.1.1.1 Výpočty působících sil hydrostatického tlaku na štít a jejich působiště

Síla od hydrostatického tlaku působící na vrata a její působiště:

$$F_{vrata} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot {h_{vrata}}^2 \cdot a = \frac{1}{2} \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}34^2 \cdot 6 = 161\,146{,}9\ N \tag{3.1}$$

$$L_{vrata} = \frac{1}{3} \cdot h_{vrata} = \frac{1}{3} \cdot 2{,}34 = 0{,}78\ m = 780\ mm \tag{3.2}$$

Síla od hydrostatického tlaku působící na odskok ve vaně těsnicího štítu a její působiště:

$$F_1^{'} = \rho \cdot g \cdot h_{vrata} \cdot (h_1 - h_{vrata}) \cdot a = 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}34 \cdot (2{,}7 - 2{,}34) \cdot 6 = 49\,583{,}7\ N \tag{3.3}$$

$$F_1^{''} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_{vrata})^2 \cdot a = \frac{1}{2} \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot (2{,}7 - 2{,}34)^2 \cdot 6 = 3\,814{,}1\ N \tag{3.4}$$

$$L_1^{'} = \frac{1}{2} \cdot (h_1 - h_{vrata}) = \frac{1}{2} \cdot (2{,}7 - 2{,}34) = 0{,}18\ m = 180\ mm \tag{3.5}$$

$$L_1^{''} = \frac{1}{3} \cdot (h_1 - h_{vrata}) = \frac{1}{3} \cdot (2{,}7 - 2{,}34) = 0{,}12\ m = 120\ mm \tag{3.6}$$

$$F_1 = F_1^{'} + F_1^{''} = 49\,583{,}7\ + 3\,814{,}1 = 53\,397{,}8\ N \tag{3.7}$$

$$F_1 \cdot L_1 = F_1^{'} \cdot L_1^{'} + F_1^{''} \cdot L_1^{''} \tag{3.8}$$

$$L_1 = \frac{F_1^{'} \cdot L_1^{'} + F_1^{''} \cdot L_1^{''}}{F_1} = \frac{49\,583{,}7 \cdot 0{,}18 + 3\,814{,}1 \cdot 0{,}12}{53\,397{,}8} = 0{,}179\ m = 176\ mm \tag{3.9}$$

Síla od hydrostatického tlaku působící na boky čela těsnicího štítu a její působiště:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot {h_1}^2 \cdot (b - a) = \frac{1}{2} \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}7^2 \cdot (7{,}89 - 6) = 67\,581{,}6\ N \tag{3.10}$$

$$L_2 = \frac{1}{3} \cdot h_1 = \frac{1}{3} \cdot 2{,}7 = 0{,}9\ m = 900\ mm \tag{3.11}$$

Síla od hydrostatického tlaku působící na čelo těsnicího štítu pod vraty a její působiště:

$$F_3^{'} = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot (h_2 - h_1) \cdot b = 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}7 \cdot (6{,}17 - 2{,}7) \cdot 7{,}89 = 725\,169\ N \tag{3.12}$$

$$F_3^{''} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1)^2 \cdot b = \frac{1}{2} \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot (6{,}17 - 2{,}7)^2 \cdot 7{,}89 = 465\,988{,}2\ N \tag{3.13}$$

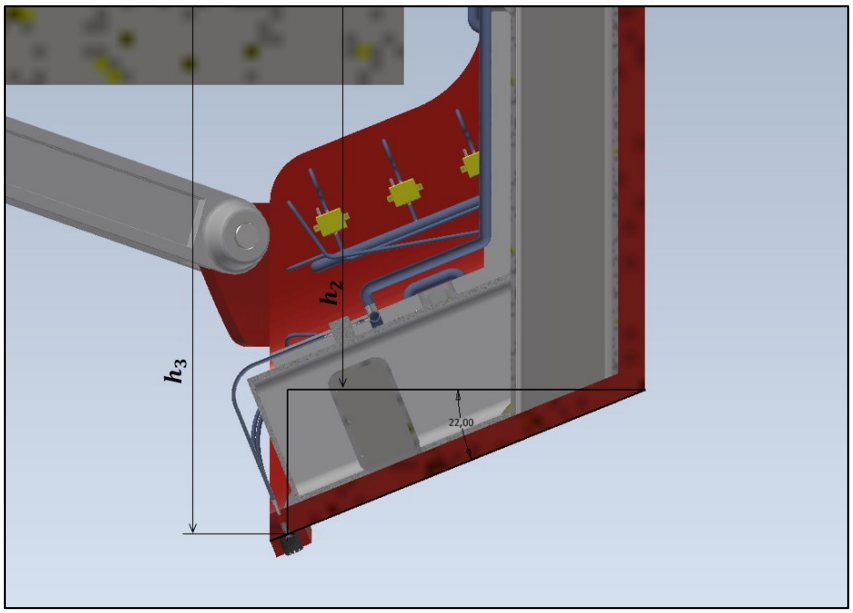
$$L_3^{'} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot (6{,}17 - 2{,}7) = 1{,}735\ m = 1735\ mm \tag{3.14}$$

$$L_3^{''} = \frac{1}{3} \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{3} \cdot (6{,}17 - 2{,}7) = 1{,}157\ m = 1157\ mm \tag{3.15}$$

$$F_3 = F_3^{'} + F_3^{''} = 725\,169 + 465\,988{,}2 = 1\,191\,157{,}2\ N \tag{3.16}$$

$$F_3 \cdot L_3 = F_3^{'} \cdot L_3^{'} + F_3^{''} \cdot L_3^{''} \tag{3.17}$$

$$L_3 = \frac{F_3^{'} \cdot L_3^{'} + F_3^{''} \cdot L_3^{''}}{F_3} = \frac{725\,169 \cdot 1{,}735 + 465\,988{,}2 \cdot 1{,}157}{1\,191\,157{,}2} = 1{,}509\ m = 1509\ mm \tag{3.18}$$



Obrázek 10.: Výšky hladin pro výpočty.

Síla od hydrostatického tlaku působící na spodek těsnicího štítu a její působiště:

$$F_4^{'} = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot \frac{h_3 - h_2}{sin(\alpha)} \cdot b = 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 6{,}17 \cdot \frac{6{,}465 - 6{,}17}{sin(22°)} \cdot 7{,}89 = 376\,077{,}9\ N \tag{3.19}$$

$$F_4^{''} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_3 - h_2) \cdot \frac{h_3 - h_2}{sin(\alpha)} \cdot b = \frac{1}{2} \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{(6{,}465 - 6{,}17)^2}{sin(22°)} \cdot 7{,}89 = 8\,990{,}5\ N \tag{3.20}$$

$$L_4^{'} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_3 - h_2}{sin(\alpha)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{6{,}465 - 6{,}17}{sin(22°)} = 0{,}394\ m = 394\ mm \tag{3.21}$$

$$L_4^{''} = \frac{1}{3} \cdot \frac{h_3 - h_2}{sin(\alpha)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{6{,}465 - 6{,}17}{sin(22°)} = 0{,}262\ m = 262\ mm \tag{3.22}$$

$$F_4 = F_4^{'} + F_4^{''} = 376\,077{,}9 + 8\,990{,}5 = 385\,068{,}4\ N \tag{3.23}$$

$$F_4 \cdot L_4 = F_4^{'} \cdot L_4^{'} + F_4^{''} \cdot L_4^{''} \tag{3.24}$$

$$L_4 = \frac{F_4^{'} \cdot L_4^{'} + F_4^{''} \cdot L_4^{''}}{F_4} = \frac{376\,077{,}9 \cdot 0{,}394 + 8\,990{,}5 \cdot 0{,}262}{385\,068{,}4} = 0{,}391\ m = 391\ mm \tag{3.25}$$

3.1.1.2 Tíha těsnicího štítu

Při reálné výrobě nebudou jednotlivé komponenty sestavy těsnicího štítu vyrobeny z jednoho kusu plného materiálu tak, jak jsou vymodelovány. S největší pravděpodobností se bude jednat o konstrukci oplátovanou plechy a výsledný celek tak bude znatelně odlehčen. Z tohoto důvodu je pro výpočet hmotnost 3D modelu uvažována pětinová.

$$m_{3D} = 271\,379\ kg$$

$$m_{těsnicí\ štít} = \frac{m_{3D}}{5} \tag{3.26}$$

$$G = m_{těsnicí\ štít} \cdot g = \frac{m_{3D}}{5} \cdot g = \frac{271\,379}{5} \cdot 9{,}81 = 532\,446\ N \tag{3.27}$$

3.1.1.3 Tíha vody ve vaně štítu a její působiště

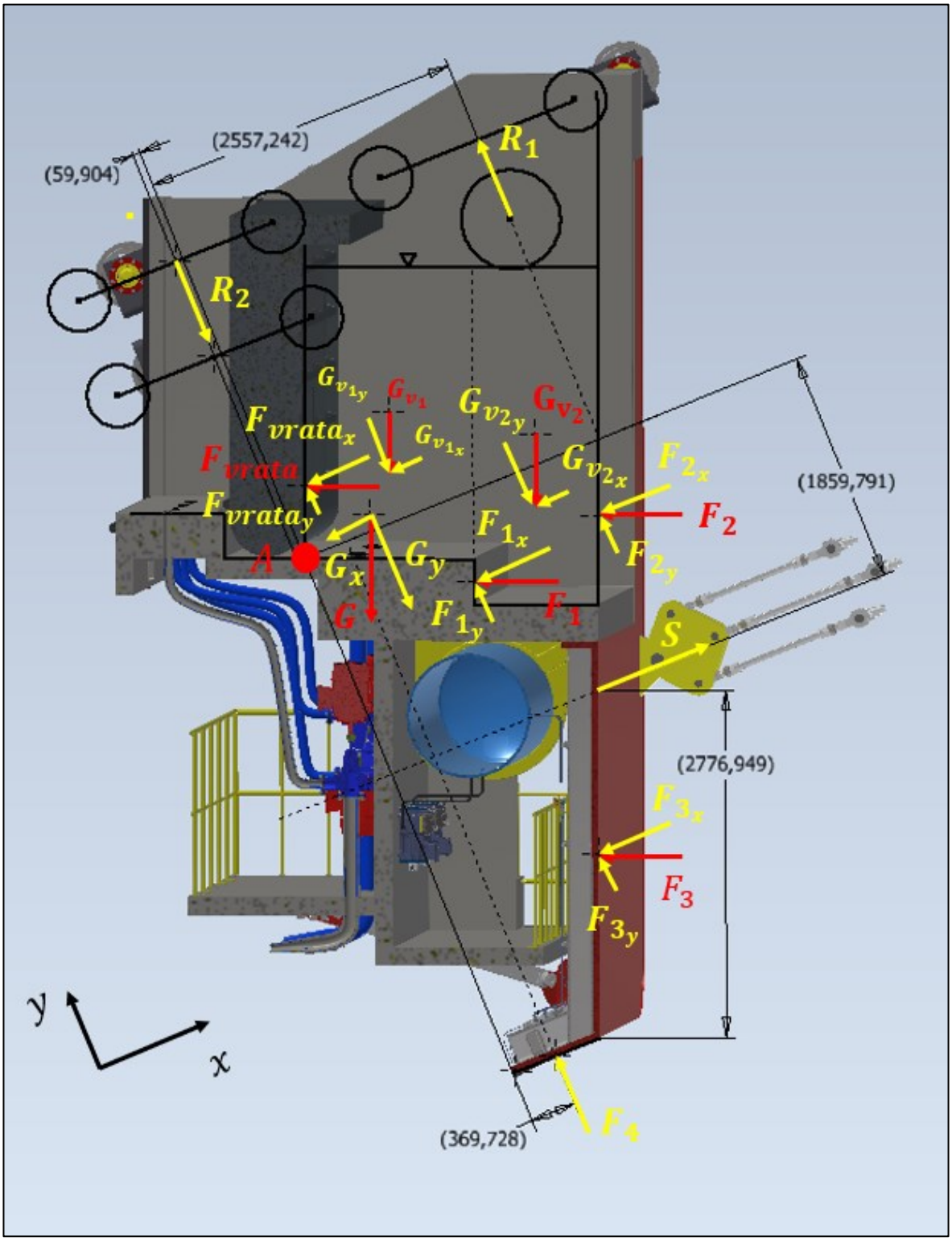
$$G_{voda_1} = \rho \cdot V_1 \cdot g = \rho \cdot a \cdot l_1 \cdot h_{vrata} \cdot g = 1\,000 \cdot 6 \cdot 1{,}37 \cdot 2{,}34 \cdot 9{,}81 = 188\,693{,}4\ N \tag{3.28}$$

$$L_{voda_1} = \frac{l_1}{2} + l_2 = \frac{1{,}37}{2} + 1 = 1{,}685\ m = 1685\ mm \tag{3.29}$$

$$G_{voda_2} = \rho \cdot V_2 \cdot g = \rho \cdot a \cdot l_2 \cdot h_1 \cdot g = 1\,000 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 2{,}7 \cdot 9{,}81 = 158\,922\ N \tag{3.30}$$

$$L_{voda_2} = \frac{l_2}{2} = \frac{1}{2} = 0{,}5\ m = 500\ mm \tag{3.31}$$

3.1.1.4 Silový rozklad



Obrázek 11.: Rozklad působících sil do x-ové a y-ové složky.

Pro následující výpočty je počátek souřadnicového systému umístěn tak, aby x-ová souřadnice byla rovnoběžná se sklonem žlabu lodního zdvihadla. Od vodorovné polohy je tedy pootočena o úhel 22°. Jednotlivé síly jsou rozloženy do složek ve směru x a y (viz obr. 11). Pro zjednodušení jsou uvažovány pouze dvě reakce na nositelkách uprostřed kol pojezdů. Následně jsou sestaveny tři rovnice o třech neznámých. Z těchto rovnic je vypočtena hmotnost protizávaží potřebná pro vyvážení štítu. Z výsledných reakcí uprostřed kol pojezdů je možné popsat chování štítu při jeho provozním zatížení.

$$F_{vrata_x} = F_{vrata} \cdot cos(\alpha) \quad (3.32)$$

$$F_{vrata_y} = F_{vrata} \cdot sin(\alpha) \quad (3.33)$$

$$F_{1_x} = F_1 \cdot cos(\alpha) \quad (3.34)$$

$$F_{1_y} = F_1 \cdot sin(\alpha) \quad (3.35)$$

$$F_{2_x} = F_2 \cdot cos(\alpha) \quad (3.36)$$

$$F_{2_y} = F_2 \cdot sin(\alpha) \quad (3.37)$$

$$F_{3_x} = F_3 \cdot cos(\alpha) \quad (3.38)$$

$$F_{3_y} = F_3 \cdot sin(\alpha) \quad (3.39)$$

$$G_x = G \cdot sin(\alpha) \quad (3.40)$$

$$G_y = G \cdot cos(\alpha) \quad (3.41)$$

$$G_{voda_{1_x}} = G_{voda_1} \cdot sin(\alpha) \quad (3.42)$$

$$G_{voda_{1_y}} = G_{voda_1} \cdot cos(\alpha) \quad (3.43)$$

$$G_{voda_{2_x}} = G_{voda_2} \cdot sin(\alpha) \quad (3.44)$$

$$G_{voda_{2_y}} = G_{voda_2} \cdot cos(\alpha) \quad (3.45)$$

$$l_G = l_1 + l_2 - L_G \quad (3.46)$$

$$l_{voda_1} = l_1 + l_2 - L_{voda_1} \quad (3.47)$$

$$l_{voda_2} = l_1 + l_2 - L_{voda_2} \quad (3.48)$$

$$l_{F_1} = h_1 - h_{vrata} - L_1 \quad (3.49)$$

$$l_{F_2} = L_2 - (h_1 - h_{vrata}) \quad (3.50)$$

$$l_{F_3} = h_2 - h_{vrata} - L_3 \quad (3.51)$$

$$l_{F_4} = 370\ mm$$

$$l_{R_1} = 2\,557\ mm$$

$$l_{R_2} = 60\ mm$$

$$L_S = 2\,777\ mm$$

$$l_S = 1\,860\ mm$$

3.1.1.4.1 Štít v provozu

Soustava tří rovnic o třech neznámých pro těsnicí štít v provozu:

$$x:\ S - F_{vrata_x} - G_x - G_{voda_{1_x}} - F_{1_x} - G_{voda_{2_x}} - F_{2_x} - F_{3_x} = 0 \quad (3.52)$$

$$y:\ R_1 + R_2 + F_{vrata_y} - G_y - G_{voda_{1_y}} + F_{1_y} - G_{voda_{2_y}} + F_{2_y} + F_{3_y} + F_4 = 0 \quad (3.53)$$

$$M_A:\ -F_{vrata} \cdot L_{vrata} + G \cdot l_G + G_{voda_1} \cdot l_{voda_1} + F_1 \cdot l_{F_1} + G_{voda_2} \cdot l_{voda_2} - F_2 \cdot l_{F_2} + F_3 \cdot l_{F_3} - F_4 \cdot l_{F_4} - R_2 \cdot l_{R_2} - R_1 \cdot l_{R_1} - S \cdot l_S = 0 \quad (3.54)$$

Maticový zápis tří rovnic o třech neznámých pro těsnící štít v provozu:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ l_S & l_{R_1} & l_{R_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S \\ R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{vrata_x} + G_x + G_{voda_{1_x}} + F_{1_x} + G_{voda_{2_x}} + F_{2_x} + F_{3_x} \\ -F_{vrata_y} + G_y + G_{voda_{1_y}} - F_{1_y} + G_{voda_{2_y}} - F_{2_y} - F_{3_y} - F_4 \\ -F_{vrata} \cdot L_{vrata} + G \cdot l_G + G_{voda_1} \cdot l_{voda_1} + F_1 \cdot l_{F_1} + G_{voda_2} \cdot l_{voda_2} - F_2 \cdot l_{F_2} + F_3 \cdot l_{F_3} - F_4 \cdot l_{F_4} \end{bmatrix}$$

Řešením soustavy tří rovnic o třech neznámých jsou získány následující hodnoty pro těsnicí štít v provozu:

- Dosazení číselných hodnot do rovnic a numerické výpočty nejsou z důvodu značného rozsahu v bakalářské práci uvedeny. Tyto výpočty byly provedeny v programu Matlab a zde jsou vypsány pouze jejich výsledné hodnoty.

  Síla protizávaží $S = 1\,695{,}7\ kN$

  Síla působící na přední pojezdy $R_1 = 11{,}2\ kN$

  Síla působící na zadní pojezdy $R_2 = -132{,}2\ kN$

3.1.1.4.2 Odstavený štít

Je potřeba pracovat i s variantou, kdy je šikmý těsnicí štít odstaven např. pro zimní období nebo období sucha. Na štít tak nepůsobí hydrostatický tlak ani tíha vody.

Soustava tří rovnic o třech neznámých pro odstavený těsnicí štít:

$$x\colon\ S - G_x = 0 \tag{3.55}$$

$$y\colon\ R_1 + R_2 - G_y = 0 \tag{3.56}$$

$$M_A\colon\ G \cdot l_G - R_2 \cdot l_{R_2} - R_1 \cdot l_{R_1} - S \cdot l_S = 0 \tag{3.57}$$

Maticový zápis tří rovnic o třech neznámých pro odstavený těsnicí štít:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ l_S & l_{R_1} & l_{R_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S \\ R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G \cdot l_G \end{bmatrix}$$

Řešením soustavy tří rovnic o třech neznámých jsou získány následující hodnoty pro odstavený těsnicí štít:

- Dosazení číselných hodnot do rovnic a numerické výpočty jsou opět provedeny v programu Matlab a nebudou zde uvedeny.

  Síla protizávaží $S = 199{,}5\ kN$

  Síla působící na přední pojezdy $R_1 = -48{,}9\ kN$

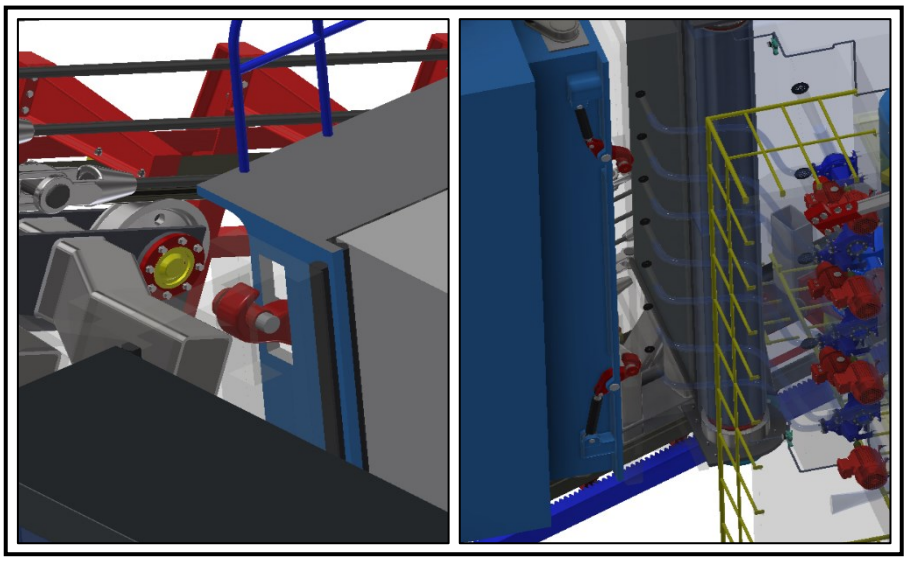
  Síla působící na zadní pojezdy $R_2 = 542{,}6\ kN$

3.1.1.4.3 Výsledky výpočtů

Při provozním stavu nabývá reakce R_2 záporné hodnoty. Nedochází tak k předpokládanému překlápění těsnicího štítu v důsledku tlakové síly vody a opření pojezdů o horní kolejnici. Naopak při odstavení těsnicího štítu dochází k jeho překlápění a je potřeba horních pojezdů na spodním kraji vany, které jsou k zabránění tohoto překlápění orientovány koly vzhůru. Tyto pojezdy se pohybují po kolejnici upevněné na ocelové konstrukci. Pro snadnou manipulaci s těsnícím štítem a celkovou bezpečnost v provozním stavu byly přidány pojezdy i na horní kraj štítu, čímž je zamezeno případnému překlápění v jakémkoli směru.

3.2 Spojení lodní vany s těsnicím štítem

Pohyblivá lodní vana je po dosednutí na těsnicí štít zaaretována a dotažena na těsnění vany těsnicího štítu čtyřmi háky ovládanými hydraulickými písty, které jsou umístěny na pohyblivé lodní vaně. Dojde tak ke vzájemnému utěsnění pomocí tlakové síly působících pístů. Princip zatěsnění je znázorněn na obr. 12.



Obrázek 12.: Zatěsnění štítu a pohyblivé vany pomocí háků.

Po dotěsnění je vyrovnávací komora mezi štítem a lodní vanou napuštěna vodou a dochází tak k vyrovnání hladin. Napuštění je zajištěno přečerpáním vody z přehrady potrubím pomocí čtyř čerpadel, která jsou uložena na stěně pod vanou štítu. Po vyrovnání hladin dojde ke sklopení vrat pohyblivé vany i štítu a loď může proplout.

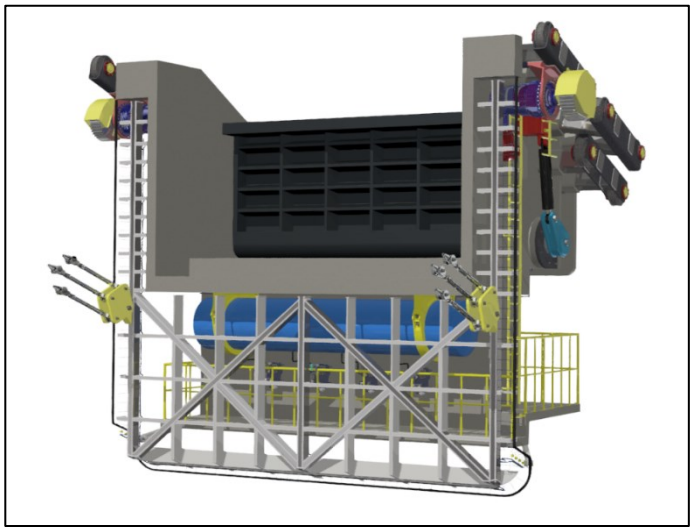
Pro spuštění pohyblivé lodní vany do spodní pozice je nejprve nutné odčerpat vodu z vyrovnávací komory mezi pohyblivou vanou a těsnicím štítem. Tato voda je vypuštěna třemi čerpadly do žlabu lodního zdvihadla. Následně dojde k odpojení háků a spuštění pojízdné vany do spodní stanice pod přehradou.

3.3 Celková konstrukce šikmého těsnicího štítu

V příloze jsou uvedeny odkazy a výřezy z katalogů všech použitých komponentů, příloha obsahuje i produkty, ze kterých bylo při základním konstrukčním návrhu vycházeno. Detailní fotky navržených konstrukčních prvků štítu obsahuje příloha obrázků.

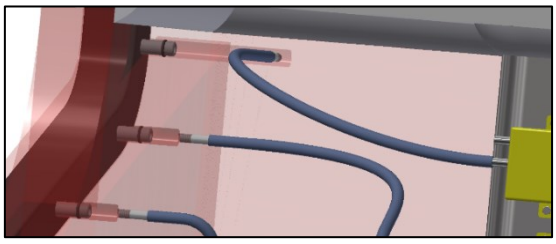
3.3.1 Těsnicí štít

Hlavní kostra těsnicího štítu je tvořena svařencem nosníků obdélníkového profilu ISO 10799-2 200x120x10. Tato kostra z nosníků je proložena svislými a vodorovnými žebry, které do sebe vzájemně zapadají a které jsou následně svařeny dohromady. Celá kostra je z čelní strany a boků oplátována plechy. Na obr. 13 je tato konstrukce zobrazena.



Obrázek 13.: Konstrukce štítu.

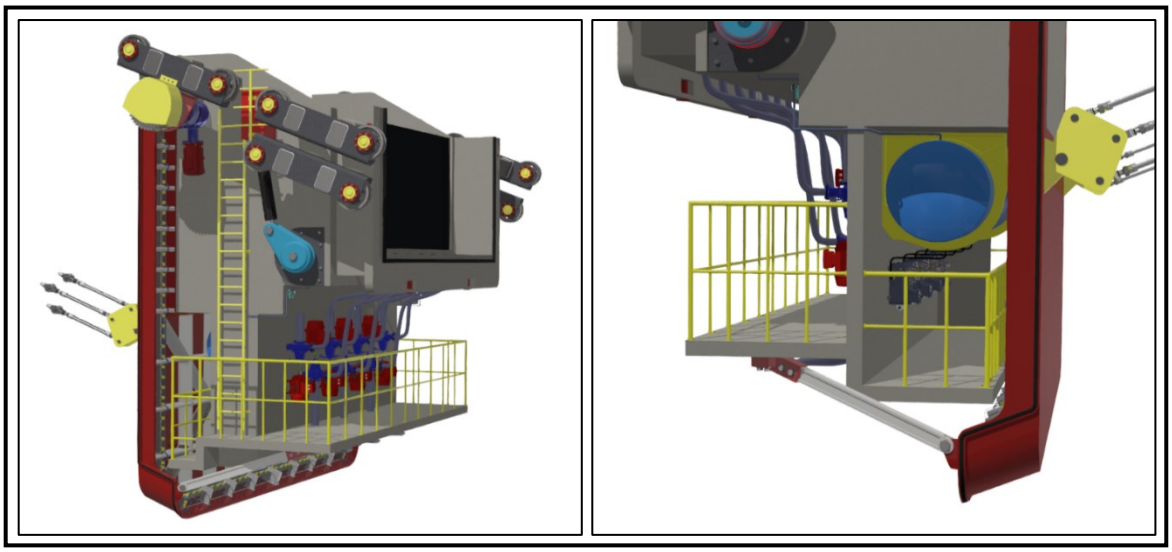
Štít je po svém obvodu opatřen souvislým žlábkem pro nafukovací těsnění. Tento žlábek zabraňuje posunutí nafukovacího těsnění při pohybu štítu, ochraňuje ho proti protržení a drží ho v poloze potřebné k utěsnění štítu. Do žlábku nafukovacího těsnění jsou tělem štítu vedeny kanálky pro přívod vzduchu do jednotlivých komor nafukovacího těsnění (viz obr. 14). Na jednom konci jsou výstupy těchto komor navrženy pro osazení těsnění hubicemi, druhý konec je opatřen závity pro vzduchotěsné spojení s nátrubky ke zpětným ventilům.



Obrázek 14.: Kanálky v těle štítu pro přívod vzduchu do nafukovacího těsnění.

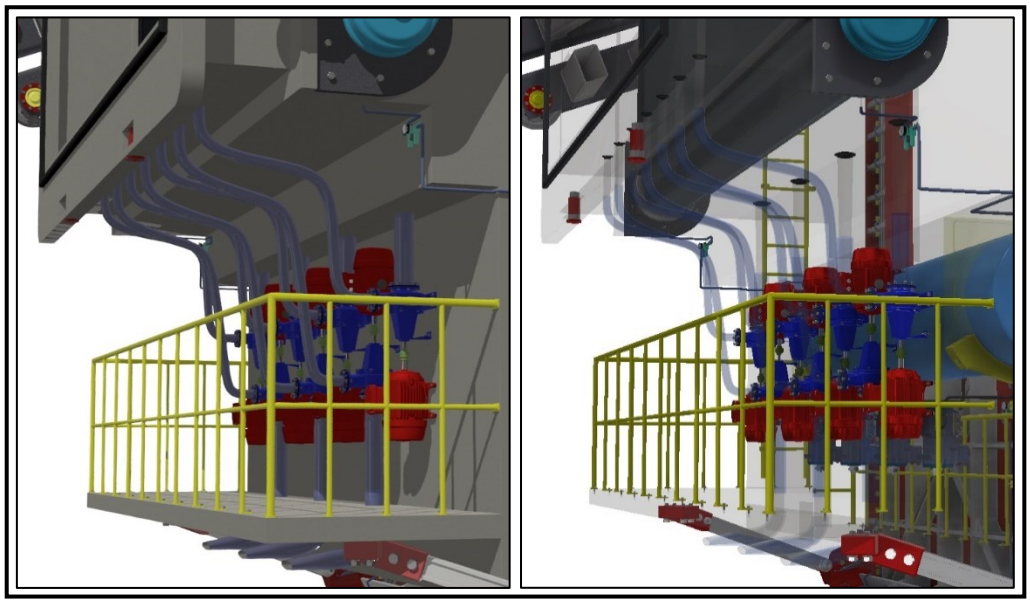
3.3.2 Konstrukce vany štítu

Při návrhu konstrukce vany štítu není cíleno na výrobní konstrukci vany jako takové, ale na konstrukční návrh vany z hlediska celkové funkce navrhovaného těsnicího štítu. V případě reálné výroby by byla vana do výsledné podoby nejspíše svařena z mnoha jednotlivých kusů. Jednalo by se s největší pravděpodobností o konstrukci z nosníků a žeber oplátovanou plechy. Pod samotnou vanou štítu jsou umístěny všechny potřebné komponenty pro zajištění funkčnosti těsnicího štítu. Z jedné strany jsou umístěna čerpadla pro napouštění a vypouštění vyrovnávací komory, na druhé straně se nacházejí kompresory s vzduchovým zásobníkem. Čerpadla a kompresory jsou přišroubovány do stěny vany, vzduchový zásobník je uložen v přírubách. Přístup na servisní plošinu pod vanu štítu je zajištěn pomocí dvou žebříků na levé straně vany štítu. Na obr. 15 je možné vidět návrh jak uložení čerpadel, kompresorů s vzduchovým zásobníkem, tak i přístup na montážní plošinu.



Obrázek 15.: Umístění čerpadel, kompresorů a vzduchového zásobníku.

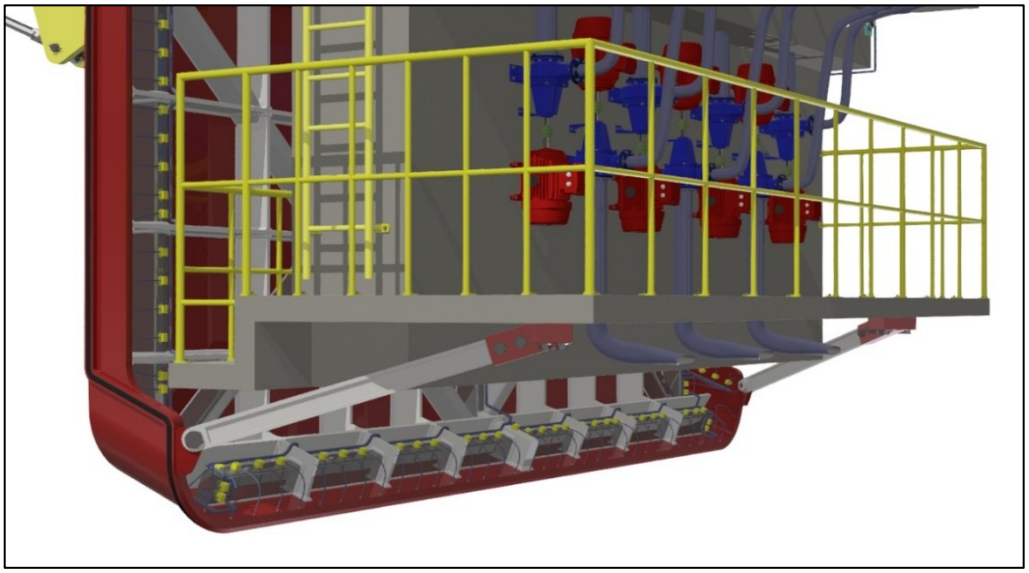
Vana štítu plní funkci vyrovnání vody mezi nádrží a pohyblivou vanou lodního žlabu. Potrubím je do vyrovnávací komory přiváděna voda z přehrady pomocí čerpadel a následně je tuto voda vypouštěna z vyrovnávací komory do dráhy lodního zdvihadla (viz obr. 16). Pro zmírnění rizika poškození čerpadel načerpáním nečistot a usazenin ze dna jsou výstupy potrubí opatřeny mřížkami, které tyto nečistoty zachycují. Objem vyrovnávací komory činí přibližně $11\,500\,l$ vody. Při použití čtyř odstředivých čerpadel SIGMA 65-CVX-160-15-3-LC-000-1, každé s průtokem $18\,l/s$, je tak vyrovnávací komora napuštěna přibližně za necelé 3 minuty a vypuštěna za $3{,}5$ minuty. Jelikož 3D model čerpadla SIGMA CVX však výrobce neposkytuje ke stažení, pro 3D návrh modelu těsnicího štítu tak byl použit rozměrově co nejvíce odpovídající model čerpadla. Čerpadlo SIGMA CVX má však oproti tomuto modelu příruby vzájemně pootočené o $45°$ vůči ose hnacího hřídele, tudíž by potrubí muselo být upraveno pro specifické použití právě čerpadla SIGMA CVX. Výřez z katalogu pro odstředivá čerpadla SIGMA CVX s odkazem na tento katalog je uveden v příloze [6].



Obrázek 16.: Potrubí vyrovnávací komory.

3.3.3 Spojení štítu s vanou štítu

Štít s vanou štítu je po jejich sestavení svařen po celém obvodu, vzniká tak jeden nerozebíratelný celek. Na spodní straně štítu je na každé straně pomocí čepu uchycena vzpěra nejen pro vyztužení štítu, ale i k zabránění případného propouštění vody vlivem ohybu štítu ve spodní části způsobeným zatížením od hydrostatického tlaku (viz obr. 17).

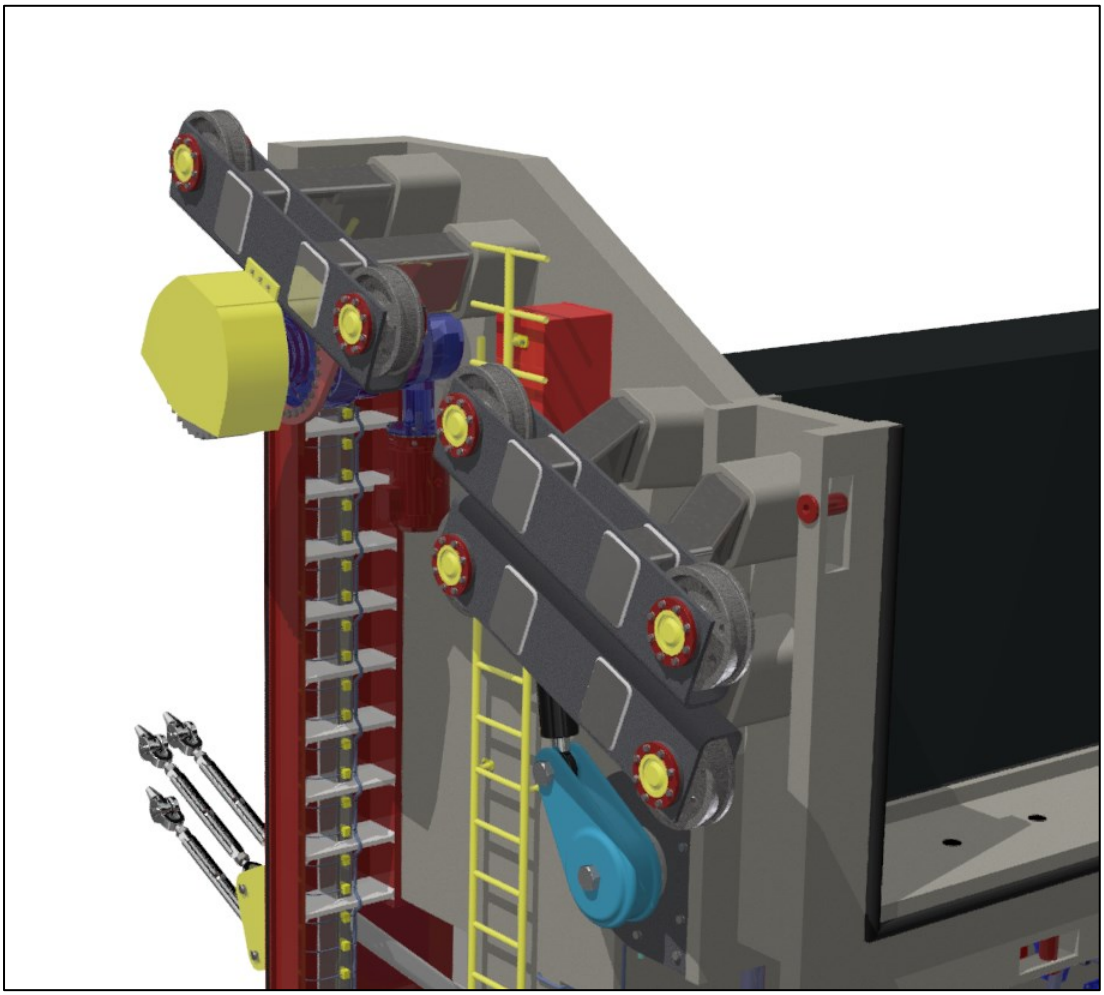


Obrázek 17.: Vzpěry štítu.

3.4 Návrh pojezdů šikmého těsnicího štítu

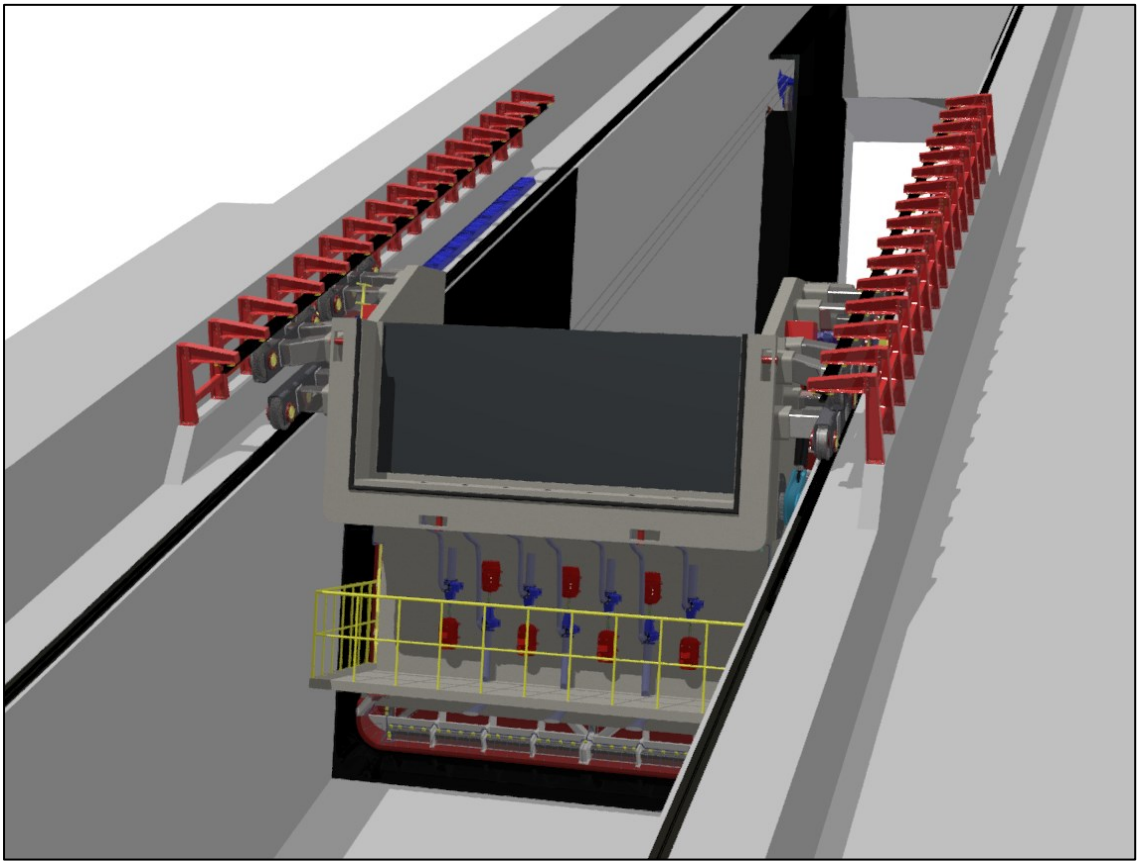
Pro pojezdové ústrojí byly jako základ zvoleny jeřábové pojezdy Wheelset SRAE 500 od firmy SIBRE s maximální únosností každého kola pojezdu $40\ t$. Celková sestava šesti pojezdů o 12 kolech tak vyhovuje provozování štítu s dostatečnou bezpečností. Výřez z katalogu pro jeřábové pojezdy SIBRE Wheelset SRAE 500 a odkaz na tento katalog jsou uvedeny v příloze [7].

Do upravených příčníků jeřábových pojezdů Wheelset SRAE 500 jsou přivařeny nosníky spojené s konstrukcí vany těsnicího štítu. Vana těsnicího štítu je tak z každé strany opatřena pohonnou jednotkou a třemi pojezdy, z nichž dva jsou orientovány koly vzhůru. Toto konstrukční řešení návrhu pojezdů s pohonem je znázorněno na obr. 18.



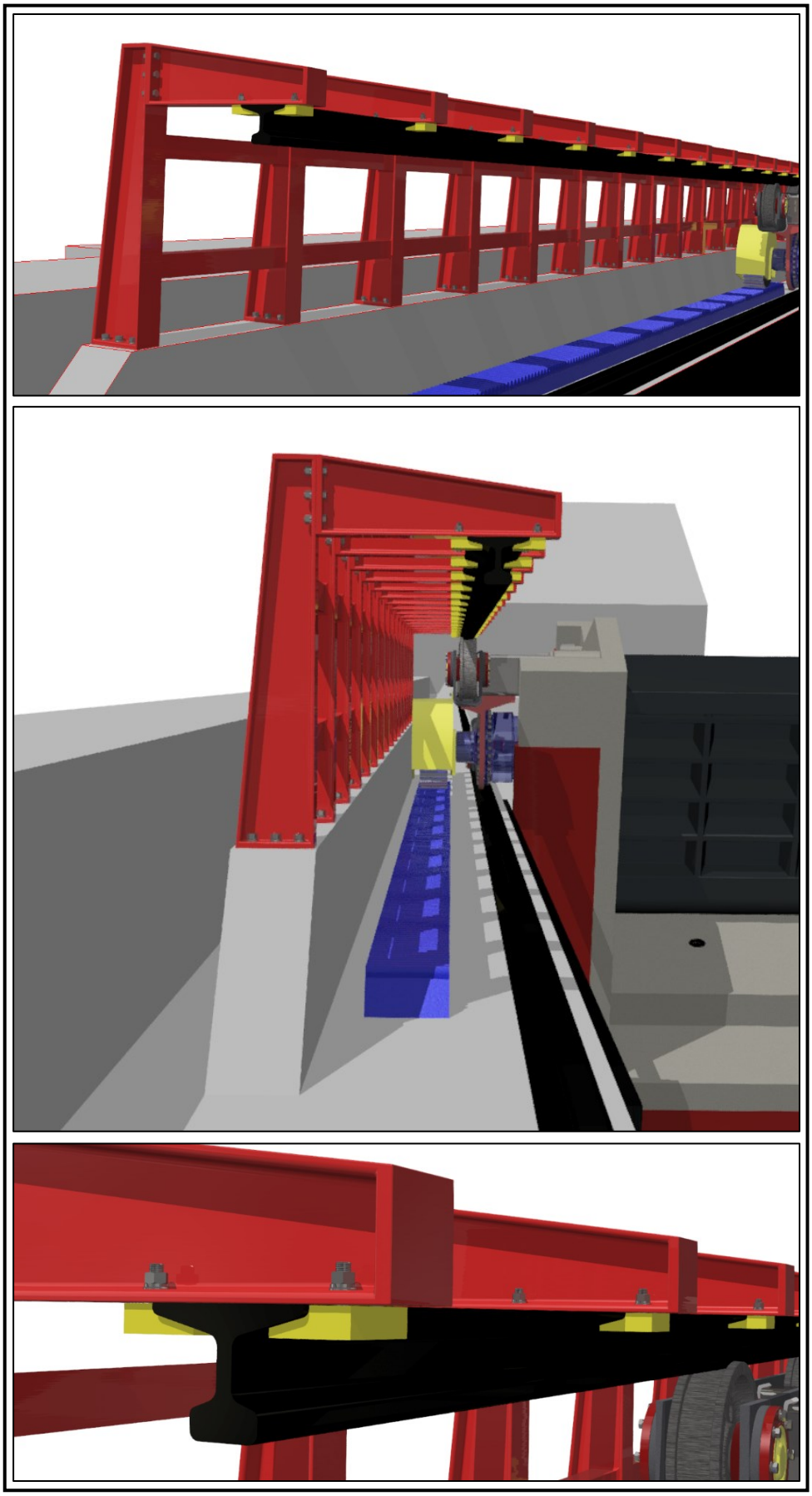
Obrázek 18.: Pojezdy vany štítu.

Dráha zdvihadla je po celé své délce opatřena dvěma kolejnicemi, na kterých jezdí jak spodní pojezd těsnicího štítu, tak i pohyblivá vana lodního žlabu. V pracovní úrovni těsnicího štítu je dráha zdvihadla osazena na každé straně nosnou konstrukcí s kolejnicí, po které jezdí oba horní pojezdy těsnicího štítu orientované koly vzhůru. Těsnicí štít je tak zajištěn proti jakémukoliv překlápění. Na obrázku č. 19 je znázorněn konstrukční návrh pojezdů těsnicího štítu v dráze lodního zdvihadla.



Obrázek 19.: Pojezdové ústrojí.

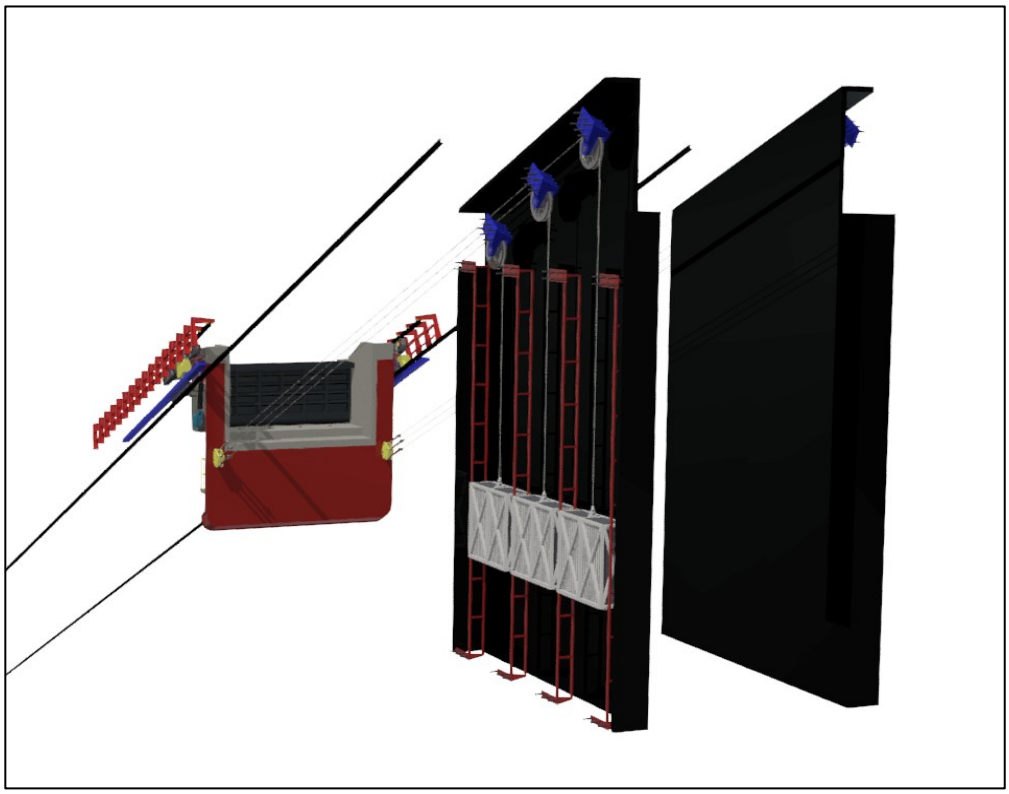
Návrh nosné konstrukce horní kolejnice na každé straně dráhy zdvihadla vychází ze sestavy šestnácti nosných profilů svařených do základní konstrukce. Celý tento komplet je přišroubován do betonové dráhy lodního zdvihadla. Následně jsou na jednotlivé nosné profily takto vzniklé konstrukce pomocí šroubových spojů připevněny profily nesoucí kolejnici. Kolejnice horních pojezdů je k jednotlivým nosným profilům připevněna přitažením šrouby přes tvarované profily na každé straně kolejnice. Návrh kompletu nosné konstrukce je znázorněn na obr. 19 a obr. 20. Princip uchycení kolejnice ke konstrukci je detailněji znázorněn na obr. 20.



Obrázek 20.: Nosná konstrukce s kolejnicí.

3.5 Vyvážení těsnicího štítu

Těsnicí štít je na každé straně vyvážen třemi protizávažími (viz obr. 21). V provozu byla pro těsnicí štít vypočtena potřebná síla závaží k jeho vyvážení $S = 1\,695{,}7\ kN$. Výpočet této reakce byl proveden v kapitole 3.1.1.4.1.



Obrázek 21.: Vyvážení těsnicího štítu.

Výpočet celkové hmotnosti protizávaží potřebné k vyvážení štítu:

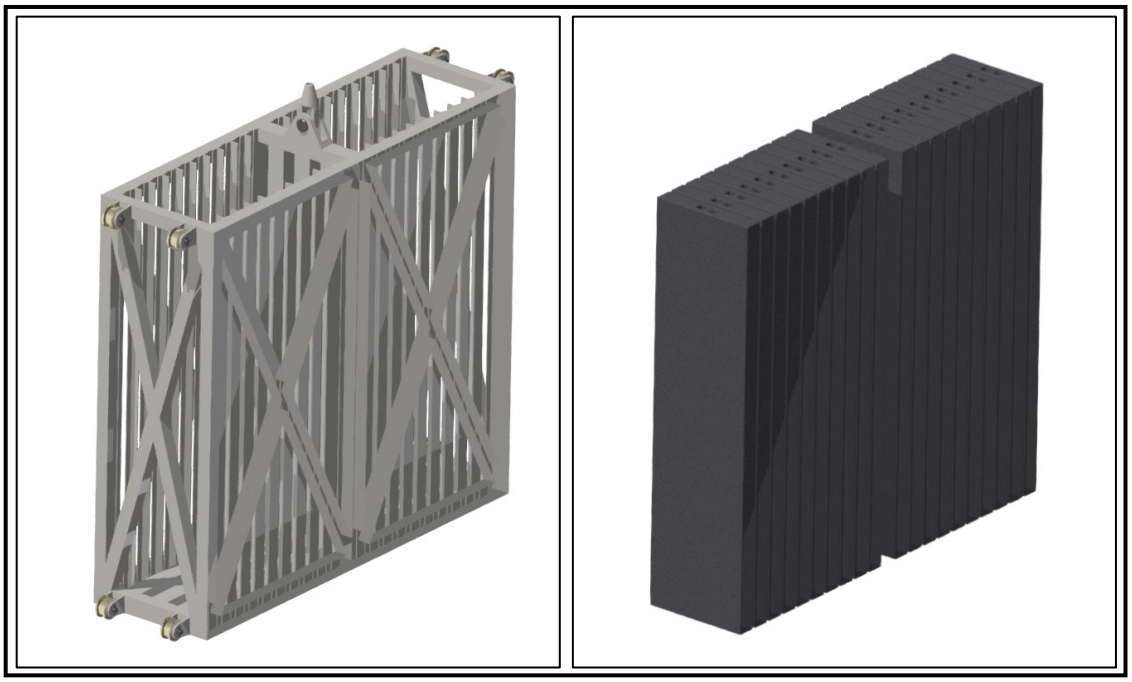
$$m_{protizávaží\ celková} = \frac{S}{g} = \frac{1\,695{,}7 \cdot 10^3}{9{,}81} = 172\,854{,}2\ kg \tag{3.58}$$

Hmotnost jednoho protizávaží:

Celková sestava protizávaží je tvořena z šesti jednotlivých protizávaží, tedy ze tří na každé straně. Hmotnost každého protizávaží je tak jedna šestina celkové hmotnosti potřebné k vyvážení štítu.

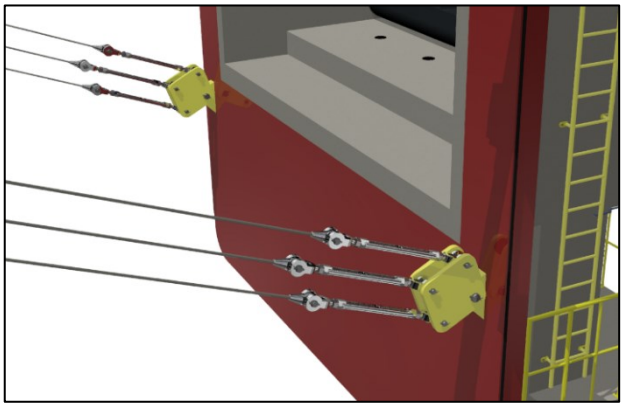
$$m_{protizávaží} = \frac{m_{protzávaží\ celková}}{6} = \frac{172\,854{,}2}{6} = 28\,809\ kg \tag{3.59}$$

Jednotlivá protizávaží se skládají ze svařeného koše, v němž je naskládáno dvacet odlitých závaží. Každé z těchto závaží má hmotnost $1\,000\ kg$. Závaží mají odlitá oka pro snadnou manipulaci pomocí jeřábu při jejich skládání do koše. Konstrukční návrh koše protizávaží s jednotlivými závažími je detailněji zobrazen na obr. 22.

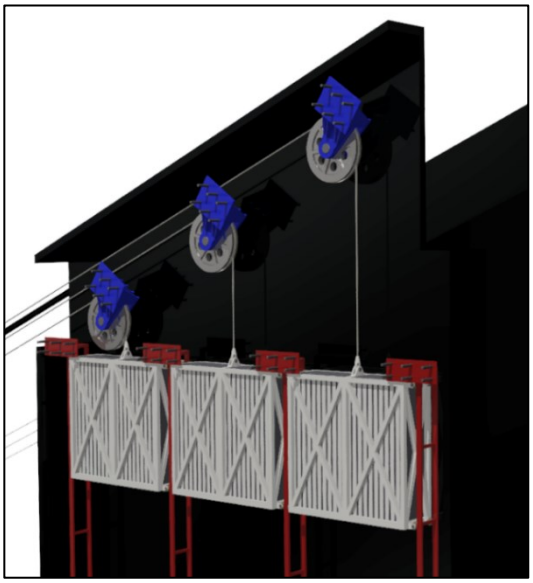


Obrázek 22.: Koš se závažími.

Jednotlivá protizávaží jsou zavěšena na ocelových lanech, která jsou vedena přes kladky uchycené ve stěně dráhy zdvihadla. Lana jsou ke konstrukci šikmého těsnicího štítu uchycena pomocí lanových napínáků. Konstrukční návrh vedení lan a jejich uchycení je zobrazen na obr. 23 a obr. 24. Svařený koš protizávaží je opatřen osmi pojezdovými koly (viz obr. 22). Tato kola jsou vedena vodící konstrukcí, čímž je zabráněno rozhoupání protizávaží při posouvání štítu (viz obr. 21, obr. 24 a obr. 25).



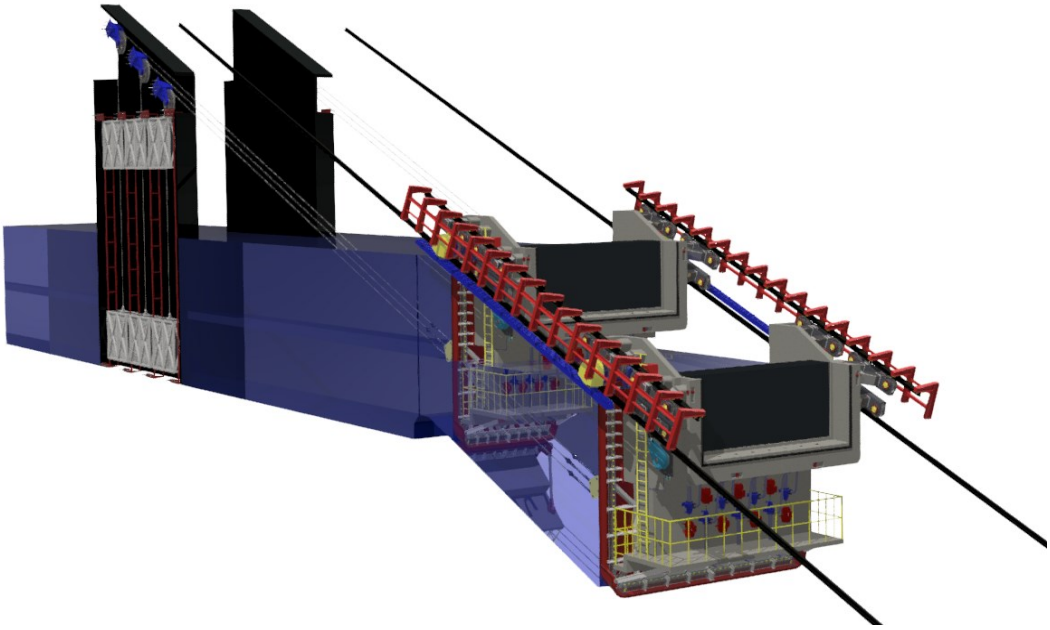
Obrázek 23.: Uchycení ocelových lan ke štítu pomocí lanových napínáků.



Obrázek 24.: Vedení ocelových lan přes kladky.

Protizávaží jsou umístěna u konce dráhy lodního zdvihadla. Pro zachování co největší plavební šířky s co nejmenšími zásahy do vybudované dráhy zdvihadla je zvoleno suché uložení těchto protizávaží. Při pohybu protizávaží je pro vyvážení štítu v pracovních polohách potřeba značné dráhy.

Vzhledem k tomu, že je těsnící štít navržen pro vyrovnání hladin v rozmezí od $3\,000$ do $6\,500\ mm$ ode dna dráhy zdvihadla, celá délka pracovní dráhy takto navrhnutého protizávaží se ve vodě nenachází. V tomto případě, kdy by nebylo použito oplátování, by byla při ponoření protizávaží do vody tato protizávaží nadlehčována vztlakovou silou. V polohách při částečném ponoření protizávaží by velikost vztlakové síly závisela na ponořené části protizávaží a při polohách štítu, kdy by protizávaží nebyla ponořena, by vztlaková síla vůbec nepůsobila. Reakce od protizávaží působící na těsnicí štít by tak nabývala proměnných hodnot v důsledku polohy protizávaží v pracovní dráze a štít by nebyl ve všech svých pracovních polohách ideálně vyvážen. Aby se protizávaží po celé své pracovní délce nacházela pod vodou, musel by být použit jiný konstrukční návrh a dráha lodního zdvihadla by tak musela být značně upravena. Oblast, ve které se posouvá protizávaží, je tedy oplátována (viz obr. 25). Po celé pracovní délce tak na protizávaží působí pouze gravitační tíha. Protizávaží navíc nepodléhají zvýšené korozi, jelikož nejsou přímo vystavena vodě. Voda, která se do tohoto prostoru dostane, například vlivem deště, je vyčerpána čerpadly.



Obrázek 25.: Oplátování protizávaží k zamezení působení vztlakové síly v určitých pracovních polohách šikmého těsnicího štítu.

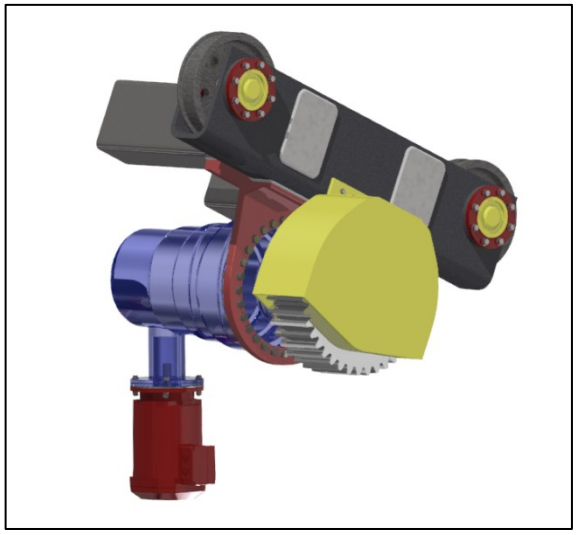
3.6 Návrh pohonu šikmého těsnicího štítu

Jelikož je těsnicí štít vyvážen protizávažím, k jeho pohybu tak stačí vyvodit pouze malé síly k překonání pasivních odporů.

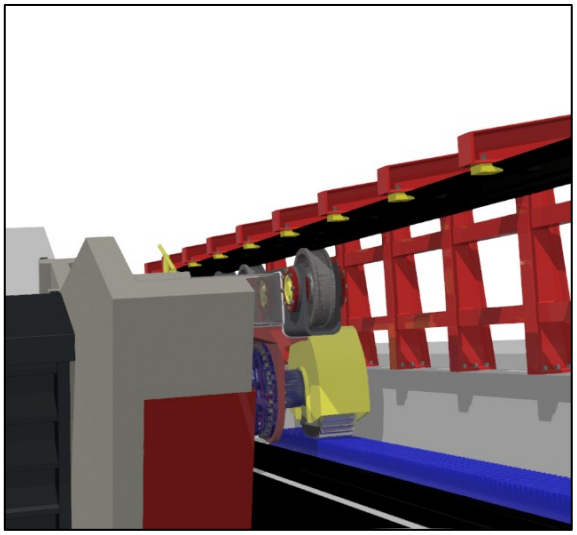
Pohon štítu je tvořen dvěma hnacími jednotkami na každé straně štítu upevněnými na nosníky pojezdů. Sestava pohonné jednotky je zobrazena na obr. 26. Je složena z asynchronního motoru, planetové převodovky a ozubeného hnacího kola. Pohyb štítu je zajištěn odvalováním ozubeného kola po ozubeném hřebenu umístěném na žlabu dráhy lodního zdvihadla (viz obr. 27). Ozubený hřeben je instalován po celé pracovní délce těsnicího štítu.

Asynchronní elektromotory hnací jednotky jsou zvoleny na základě vypočteného výkonu potřebného k pohybu štítu.

Převodovka je zvolena dle jmenovitého točivého momentu, výkonu motoru a celkového převodového poměru.



Obrázek 26.: Hnací jednotka připevněná na nosník pojezdů.



Obrázek 27.: Záběr ozubeného kola s ozubeným hřebenem, který je umístěn po celé pracovní délce těsnicího štítu.

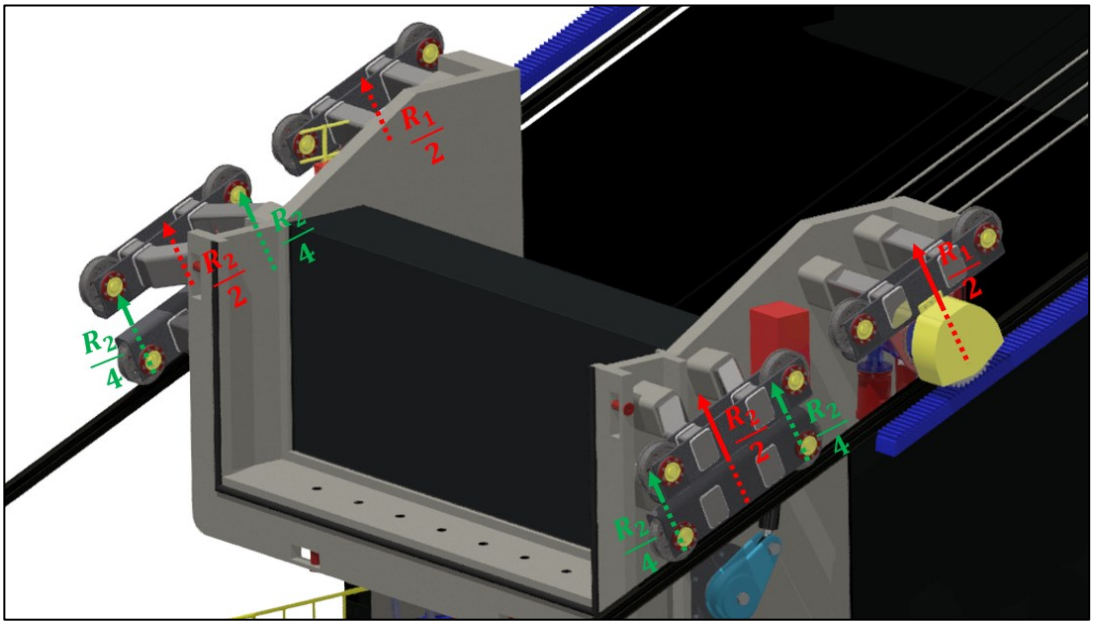
3.6.1 Návrh elektromotoru

3.6.1.1 Výpočet potřebného výkonu motoru

Pasivní odpory pojezdových kol pro provozní stav:

Při výpočtu je vycházeno z reakcí vypočtených v kapitole 3.1.1.4.1 působících na těsnicí štít. Z výsledných reakcí těchto výpočtů je patrné, že štít není v provozním stavu působícími silami nijak překlápěn. V horní části jsou zatížena ozubená kola, ve spodní části štít dosedá na dolní pojezdy, u kterých budeme uvažovat pasivní odpory (viz obr 28). Pasivní odpory ozubených kol a nezatížených pojezdů zanedbáme. Stejně tak zanedbáme ostatní vlivy vznikající při pohybu štítu. Všechny tyto zanedbané vlivy však budou zahrnuty v celkové účinnosti pohonné sestavy.

Za ostatní vlivy je možné uvažovat síly od unikající vody mezi těsněním a oplátováním, které vznikají při vyfouknutí těsnění a ovlivňují tak pohyb štítu, změny tlakového působení vody na štít vlivem nárazu vln na štít, sílu větru a další povětrnostní podmínky. Všechny tyto vlivy by však následující výpočty velice zkomplikovaly. Do výpočtů tedy nebudou uvažovány a výsledný motor s převodovkou bude dimenzován několikanásobně silnější, něž je vypočtená hodnota s ohledem na tyto nezapočtené ostatní vlivy, které působí při pohybu jako pasivní odpory.



Obrázek 28.: Působení reakcí v provozním stavu.

Pasivní odpory pro každé kolo spodních pojezdů:

- průměr pojezdového kola: $D_{kolo} = 500\ mm$
- poloměr čepu: $r_č = 45\ mm$
- valivé tření: $e = (0{,}6 \div 0{,}8)\ mm \rightarrow zvoleno\ e = 0{,}8\ mm$
- čepové tření valivé: $f_č = (0{,}01 \div 0{,}02) \rightarrow zvoleno\ f_č = 0{,}02$
- další odpory: $x = (1{,}5 \div 1{,}8) \rightarrow zvoleno\ x = 1{,}8$

Odpor každého pojezdového kola v provozním stavu je vypočten ze vztahu:

$$F_{kolo} = \frac{\frac{|R_2|}{4}}{\frac{D_{kolo}}{2}} \cdot (e + f_{č} \cdot r_{č1}) \cdot x = \frac{\frac{132\,200}{4}}{\frac{500}{2}} \cdot (0{,}8 + 0{,}02 \cdot 45) \cdot 1{,}8 = 404{,}5\ N \tag{3.60}$$

Celková síla pro čtyři pojezdová kola:

$$F_{celková} = 4 \cdot F_{kolo} = 4 \cdot 404{,}5 = 1\,618\ N \tag{3.61}$$

Síla pro jeden pohon:

$$F_{pohon} = \frac{F_{celková}}{2} = \frac{1\,618}{2} = 809\ N \tag{3.62}$$

Potřebný výkon motoru:

- účinnost převodu je uvažována při zanedbání ostatních vlivů $0{,}9$
- zvolená rychlost posuvu štítu: $v_p = 6\ m \cdot min^{-1}$

$$P = \frac{F_{pohon} \cdot v_p}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} = \frac{809 \cdot 6}{60 \cdot 10^3 \cdot 0{,}9} \doteq 0{,}09\ kW \tag{3.63}$$

Z důvodu zanedbání ostatních vlivů působících na šikmý těsnicí štít bude motor dimenzován na několikanásobně větší výkon. Je zvolen motor SEW EURODRIVE s označením DRN132L4/FF o výkonu 9,2 kW s integrovanou brzdou. Výřez parametrů daného motoru získaných generátorem motorů SEW EURODRIVE je uveden v příloze [8] společně s odkazem na tento generátor.

3.6.2 Návrh převodovky

- průměr ozubeného kola: $d_{oz.kolo} = 760\ mm$

Výstupní otáčky:

$$n_v = \frac{v_p}{\pi \cdot d_{oz.kolo}} = \frac{6}{\pi \cdot 760 \cdot 10^{-3}} \doteq 2{,}5\ ot/min \tag{3.64}$$

Celkový převod:

$$i = \frac{n_{motor}}{n_v} = \frac{1470}{2{,}5} = 588 \tag{3.65}$$

Z vypočtených hodnot byla pomocí generátoru zvolena planetová převodovka Orbi – flex 3PB-120-0560-Fxx-Dx0x od firmy Wikov s na míru uzpůsobeným napojením na zvolený motor. V příloze je uveden odkaz na generátor převodovek Orbi-flex od firmy Wikov a výřez parametrů z tohoto generátoru pro danou planetovou převodovku [9].

3.6.3 Kontrola rozběhového momentu motoru

Při pohybu šikmého těsnicího štítu je předpokládáno stálé zrychlení po dobu $t_a = 5\ s$

Jmenovitý moment:

$$M = F \cdot \frac{d_{oz.kolo}}{2} = 809 \cdot \frac{760 \cdot 10^{-3}}{2} = 307{,}42\ N \cdot m \tag{3.66}$$

Inerční síla posuvných hmot:

$$F_{ip} = \frac{F}{g} \cdot \frac{v_p}{60 \cdot t_a} = \frac{809}{9{,}81} \cdot \frac{60}{60 \cdot 5} = 16{,}5\ N \tag{3.67}$$

Celkový rozběhový moment:

$$M_{roz} = \left(F + F_{ip}\right) \cdot \frac{\frac{d_{oz.kolo}}{2}}{i \cdot \eta} = (809\ + 16{,}5) \cdot \frac{\frac{760 \cdot 10^{-3}}{2}}{588 \cdot 0{,}9} = 0{,}6\ N \cdot m \tag{3.68}$$

Celkový rozběhový moment musí být menší, než je spouštěcí moment motoru:

$$M_{roz} \leq M_{sp} = \kappa \cdot M_{Nmotoru} \tag{3.69}$$

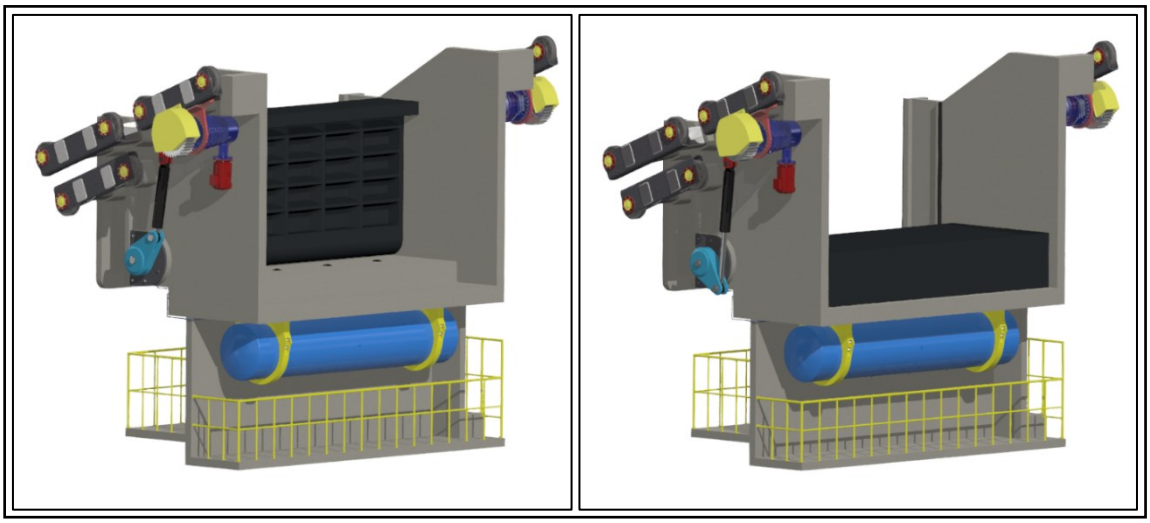
$$M_{Nmotoru} \geq \frac{M_{roz}}{\kappa} \tag{3.70}$$

$M_{Nmotoru}$ je z dokumentace $60\ Nm$, předpokládáme $\kappa > 1$, tudíž pohon vyhovuje i při rozjezdu štítu.

Veškeré výpočty pro návrh pohonu vycházejí ze skript Dopravní a manipulační systémy [10], jejich úprava vychází pro specifický návrh šikmého těsnicího štítu.

3.7 Konstrukční návrh sklopných vrat

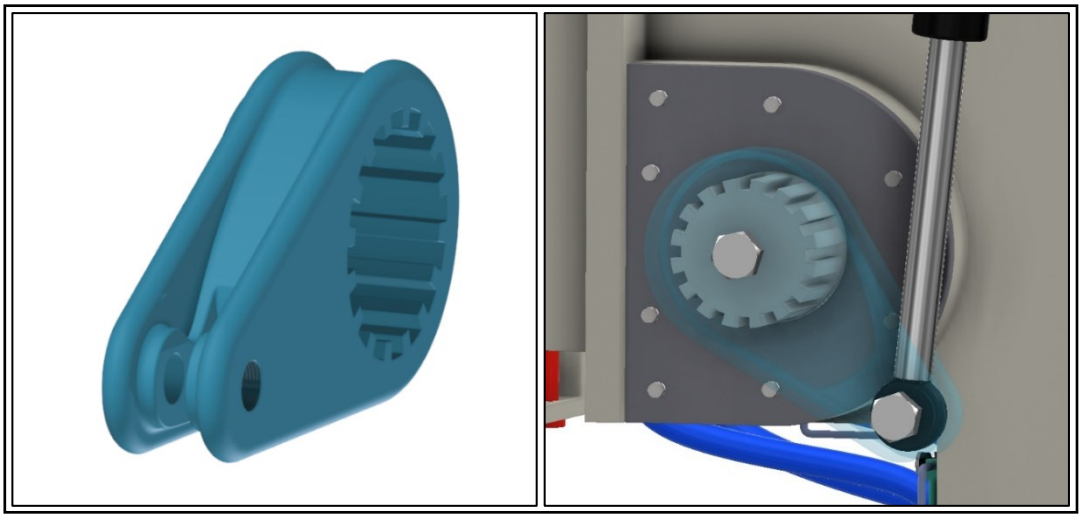
Z důvodu limitace rozměrů pro zástavbu štítu bylo zvoleno použití sklopných vrat namísto křídlových (viz. obr. 29). Díky sklopným vratům je tak dosaženo co největší možné plavební šířky, a to $6\,000\ mm$. Kvůli pracovním polohám pro limitní hladiny vody po přihlédnutí k zamezení přetékání vody při vlnobití je však plavební hloubka po sklopení vrat omezena na $1\,730\ mm$. Navržený těsnicí štít je tak vhodný pro lodě s maximálním ponorem pohybujícím se okolo $1\,500\ mm$, což je s ohledem na rozměry pohyblivé lodní vany přepravující lodě dostačující. Při použití sklopných vrat je však potřeba řešit utěsnění jejich hřídelů a konstrukční návrh je tak podstatně složitější než u vrat křídlových, kdy k tomuto problému nedochází. Navržením křídlových vrat by bylo možné dosáhnout větší plavební hloubky, plavební šířka by se naopak zmenšila. Realizace křídlových vrat ovládaných podobným způsobem by však byla také možná, avšak pro konkrétní účel se použití sklopných vrat s docílením dostatečné plavební hloubky a větší plavební šířky jeví jako vhodnější varianta.



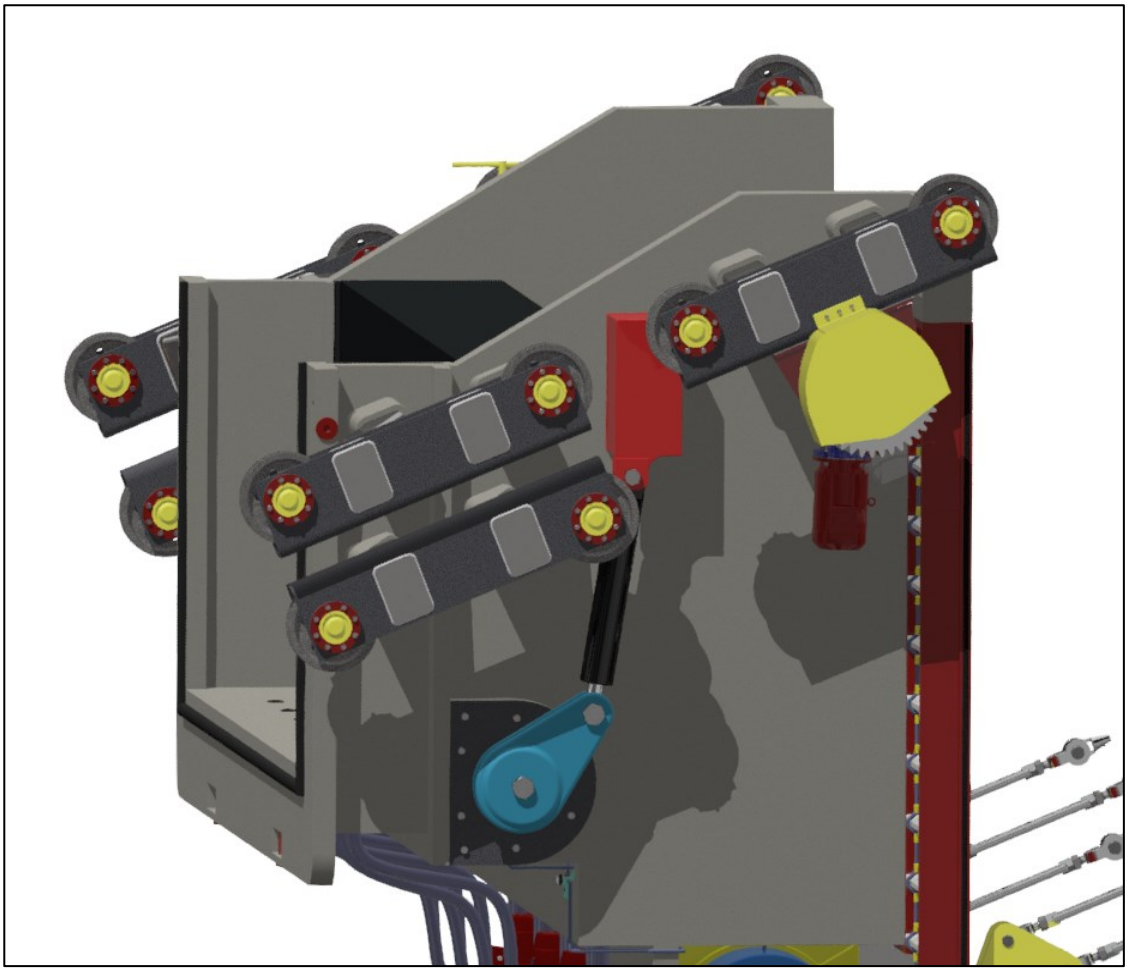
Obrázek 29.: Sklopná vrata v uzavřené a otevřené poloze.

Sklopná vrata jsou otevírána a zavírána pomocí vidlice zajištěné na hřídeli, která je ovládána hydraulickým pístem. Hřídele vrat se otáčí v těle vany štítu pomocí soudečkových ložisek. Hřídele je při tomto konstrukčním řešení nutno utěsnit jak z důvodu unikání vody z přehrady, tak i kvůli zabránění vymývání maziva z ložiska. Celkový návrh utěsnění vrat je proveden v kapitole 3.8.2.

Jelikož je rozsah pro pokrytí pohybu vrat poměrně veliký, je potřeba umístěním pístu nastavit vhodné úhly mezi pístem a vidlicí tak, aby nedocházelo k polohám, kdy píst není schopen přetlačit potřebné síly pro pohyb vrat. K těmto kritickým polohám může dojít v případě, kdy osa pístu a pomyslná osa vidlice svírají úhly blízké přímému a plnému úhlu. Prostor pro uložení pístu je však značně omezen a je nutné vidlici tvarovat tak, aby s ní pro krajní polohu při otevření vrat píst nekolidoval (viz obr. 30 a 31).



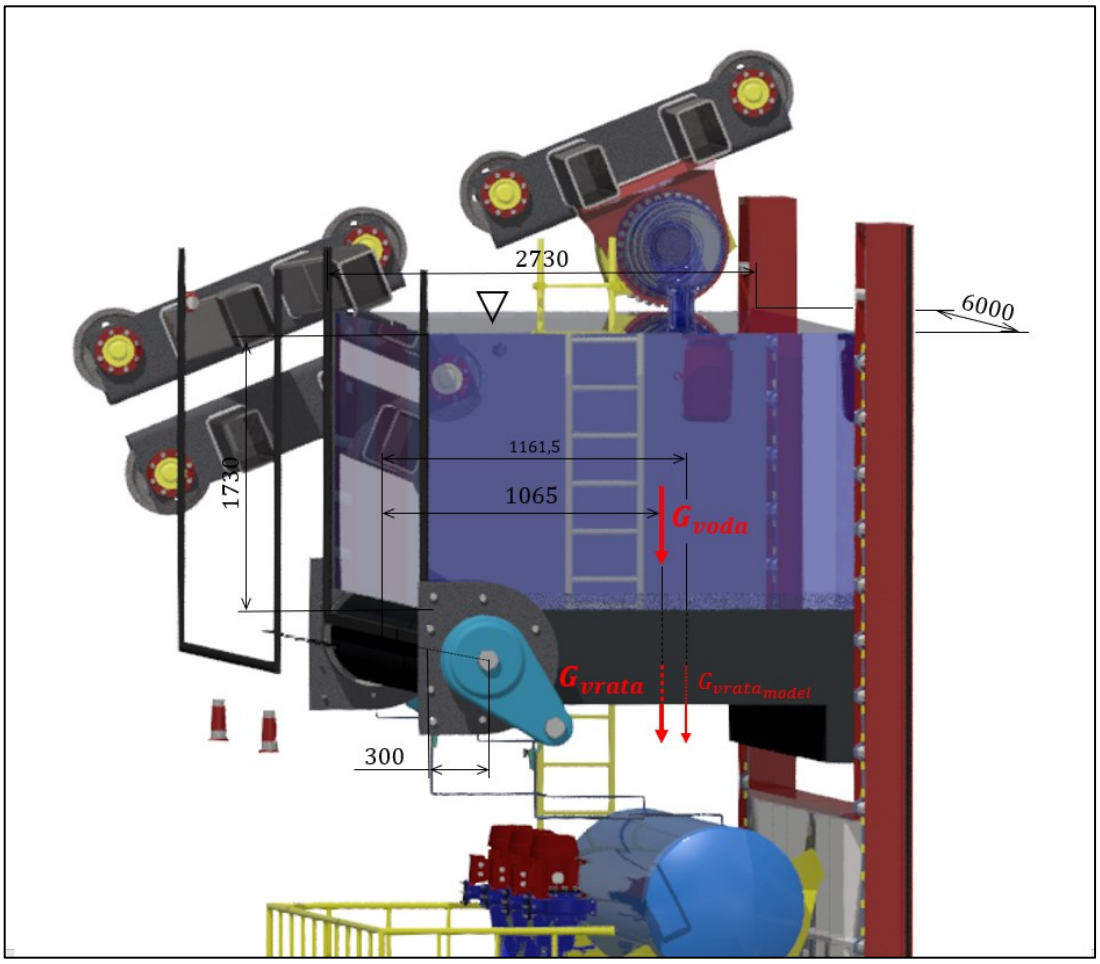
Obrázek 30.: Návrh tvaru vidlice.



Obrázek 31: Uložení pístu.

3.7.1 Kontrola hřídele vrat

Hmotnost vrat vygenerovaná programem Autodesk Inventor činí $55\,515\ kg$. Model vrat je pouze přibližný a je tvořen převážně z plného materiálu. Pro následující výpočty je tak hmotnost reálných vrat uvažována $30\,000\ kg$. Vzhledem k rozdílu vzdáleností vygenerovaného těžiště vrat a těžiště vodního sloupce nad vraty, a to pouhých $96{,}5\ mm$ od osy hřídele vrat, je pro zjednodušení výpočtů vycházeno z úvahy, že se tato těžiště nacházejí ve stejné vzdálenosti od osy hřídele vrat. Následující výpočty jsou provedeny pro hřídele samostatně, kdy na každou z nich připadá poloviční zatížení.



Obrázek 32.: Zatížení hřídelí vrat.

Hodnoty použité ve výpočtech:

- hmotnost vrat $m_{vrata} = 30\,000\ kg$
- vzdálenost těžiště vrat a vody od osy hřídele $l = 1\,065\ mm$
- hustota vody $\rho = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$
- střední hodnota gravitačního zrychlení $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$
- malý průměr hřídele $d = 340\ mm$
- velký průměr hřídele $D = 400\ mm$

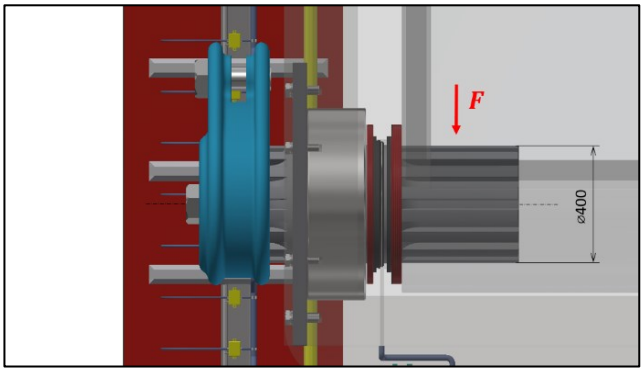
3.7.1.1 Krut

Největší kroutící moment v hřídeli vzniká při zavírání vrat (viz obr. 32). V této poloze jsou vrata plně otevřena a jsou zatížena největším možným objemem vody. Na vrata tak kromě vlastní tíhy působí i největší tíha vody.

$$M_k = \frac{m \cdot g + \rho \cdot g \cdot h \cdot A}{2} \cdot l = \frac{30\,000 \cdot 9{,}81 + 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}73 \cdot 6 \cdot 2{,}73}{2} \cdot 1{,}065 = 304\,744\ N \cdot m =$$
$$= 304\,744 \cdot 10^3\ N \cdot mm \tag{3.71}$$

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 304\,744 \cdot 10^3}{\pi \cdot 340^3} = 39{,}49\ N \cdot mm^{-2} \tag{3.72}$$

3.7.1.2 Střih



Obrázek 33.: Schéma zatížení pro střih hřídele.

Výpočty na střih hřídele vycházejí z obr. 33, kdy jsou z důvodu zjednodušení uvažovány pouze dvě kritické polohy pro kontrolu.

Vrata v otevřené poloze:

- působí tíha vody a vrat

$$F = \frac{m \cdot g + \rho \cdot g \cdot h \cdot A}{2} = \frac{30\,000 \cdot 9{,}81 + 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}73 \cdot 6 \cdot 2{,}73}{2} = 286\,145\ N \tag{3.73}$$

Vrata v uzavřené poloze:

- působí pouze tíha vrat bez vody

$$F = \frac{m \cdot g}{2} = \frac{30\,000 \cdot 9{,}81}{2} = 147\,150\ N \tag{3.74}$$

Jelikož je vycházeno z odhadu a není známa přesná hmotnost vrat, je možné říct, že síla od zatížení tíhou vody a vrat v otevřené poloze je podstatně větší než síla v uzavřené poloze, která je způsobena tíhou vrat. Pro následující výpočet střižného napětí je použita větší hodnota z těchto sil a to $F = 286\,145\ N$.

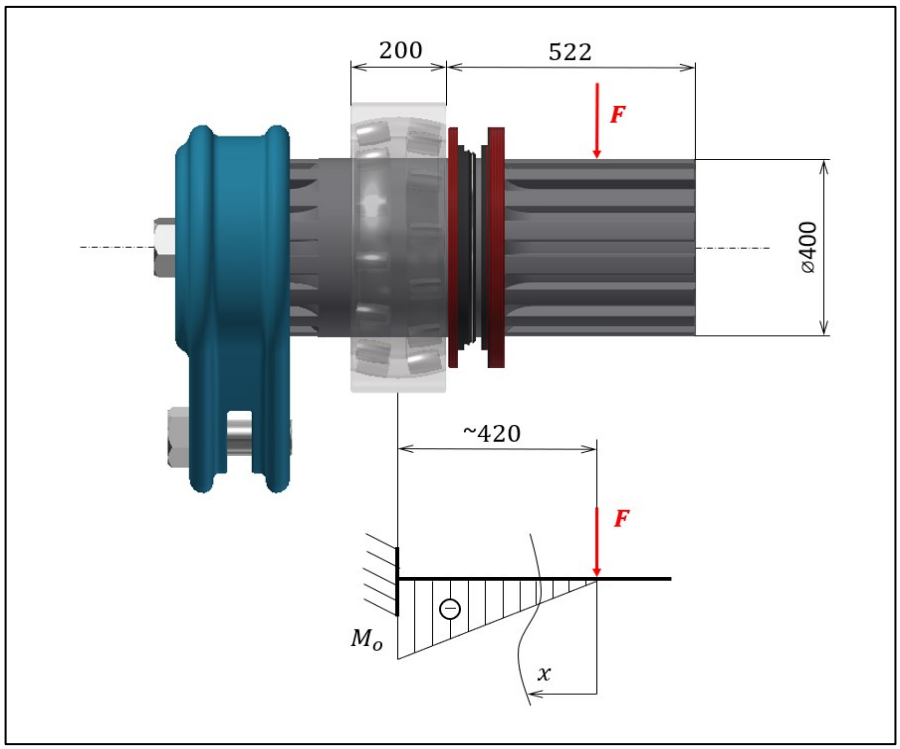
Střižná plocha:

$$S_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 340^2}{4} = 90\,792\ mm^2 \tag{3.75}$$

$$\tau_s = \frac{F}{S_s} = \frac{286\,145}{90\,792} = 3{,}15\ \ N \cdot mm^{-2} \tag{3.76}$$

3.7.1.3 Ohyb

Na obr. 34 je znázorněn ohybový moment hřídele v důsledku zatížení hřídele vraty v uzavřené poloze. Pro daný výpočet je teoreticky uvažováno vetknutí hřídele uprostřed soudečkového ložiska při působení síly s nositelkou uprostřed drážkování hřídele uloženého ve vratech.



Obrázek 34.: Ohyb hřídele.

$$F = \frac{m \cdot g + \rho \cdot g \cdot h \cdot A}{2} = \frac{30\,000 \cdot 9{,}81 + 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}73 \cdot 6 \cdot 2{,}73}{2} = 286\,145\ N\ viz\ (3.77) \tag{3.78}$$

$$x \in \langle 0\,, 420 \rangle:\ \ M_o(x) = F \cdot x \tag{3.79}$$

$$M_{o_{max}} = M_o(420) = 286\,145 \cdot 420 = 120\,180{,}9 \cdot 10^3\ N \cdot mm \tag{3.80}$$

$$\sigma_o = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} = \frac{M_{o_{max}}}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{32 \cdot M_{o_{max}}}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot 120\,180{,}9 \cdot 10^3}{\pi \cdot 340^3} = 31{,}15\ N \cdot mm^{-2} \tag{3.81}$$

3.7.1.4 Výpočet bezpečnosti hřídele při působení kombinovaného namáhání ve formě krutu, střihu a ohybu

Obecný vzorec pro výpočet redukovaného napětí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \leq \sigma_D \tag{3.82}$$

Podle teorie HMH je použito $\alpha = \sqrt{3}$, dále je uvažováno působení dvou smykových napětí, jejichž výsledná složka je vypočtena pomocí Pythagorovy věty.

$$\tau = \sqrt{\tau_k{}^2 + \tau_s{}^2} = \sqrt{39{,}49^2 + 3{,}15^2} = 39{,}62\ N \cdot mm^{-2} \tag{3.83}$$

Jako materiál je uvažovaná ocel 16 440.6, která je vhodná pro hřídele a velmi namáhané součásti s vysokou pevností.

- mez kluzu pro ocel 16 440.6: $R_e = 588{\sim}608\ MPa$
  → zvoleno $R_e = 600\ MPa$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o{}^2 + 3 \cdot \tau^2} \leq \sigma_D = \frac{\sigma_K}{k} \tag{3.84}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{31{,}15^2 + 3 \cdot 39{,}62^2} \leq \frac{\sigma_K}{k} \tag{3.85}$$

$$\sigma_{red} = 75{,}4\ N \cdot mm^{-2} \leq \frac{\sigma_K}{k} \tag{3.86}$$

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{600}{75{,}4} \doteq 8 \tag{3.87}$$

Navržená hřídel vyhovuje všem provedeným pevnostním výpočtům a se svou bezpečností přibližně 8 je dostatečně dimenzovaná pro bezpečný provoz těsnicího štítu.

3.7.1.5 Drážkování hřídele a vidlice

Drážkování hřídelů nejsou z důvodu jejich velkých rozměrů normalizované. Drážkování jsou tedy vyrobena speciálně s požadovanými rozměry $16x340x400$ a délkou funkční části drážkování $l_{drážkování} = 200\ mm$.

- součinitel nerovnoměrnosti zatížení drážek $\psi = 0{,}7 \sim 0{,}8$
  → zvoleno z důvodu bezpečnosti $\psi = 0{,}7$
- dovolený tlak pro drážkování $p_D = 120\ MPa$

V kapitole 3.7.1.1 v rovnici 3.71 byl vypočten největší kroutící moment v hřídeli $M_k = 304\,744 \cdot 10^3\ N \cdot mm$, který vzniká při zavírání vrat.

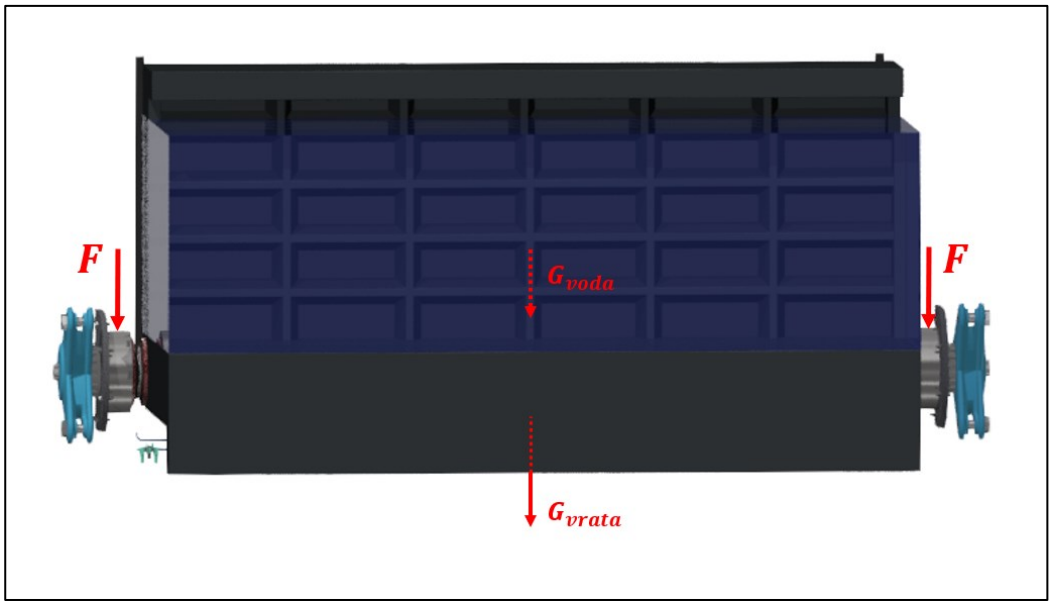
$$p = \frac{4 \cdot M_k}{h \cdot z \cdot \psi \cdot (D+d) \cdot l_{drážkování}} \leq p_D \tag{3.88}$$

$$p = \frac{4 \cdot 304\,744 \cdot 10^3}{30 \cdot 16 \cdot 0{,}7 \cdot (400+340) \cdot 200} = 24{,}5\ MPa \leq p_D \tag{3.89}$$

Drážkování je dostatečné pro přenos kroutícího momentu potřebného k pohybování se sklopnými vraty a vyhovuje s dostatečnou bezpečností rovnou přibližně hodnotě 5.

3.7.2 Kontrola ložisek

Konstrukční návrh těsnicího štítu je proveden pro použití soudečkových ložisek SKF 24180 ECA/W33 o statické únosnosti $C_0 = 10\,600\ kN$ a dynamické únosnosti $C = 6331\ kN$. Výřez z katalogu pro použitá ložiska společně s jejich odkazem na stránky výrobce je uveden v příloze [11].



Obrázek 35.: Zatížení ložisek.

Výpočty vycházejí z úvahy uvedené v kapitole 3.7.1.2, kdy síly působící na hřídel v důsledku vrat v otevřené poloze je podstatně větší než síla v uzavřené poloze. Síly působící na ložiska jsou zobrazena na obr. 35. Při výpočtech tak pracujeme s větší z nich, a to se sílou od vrat v otevřené poloze.

$$F = \frac{m \cdot g + \rho \cdot g \cdot h \cdot A}{2} = \frac{30\,000 \cdot 9{,}81 + 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}73 \cdot 6 \cdot 2{,}73}{2} = 286\,145\ N = P_r \tag{3.90}$$

Výpočet základní trvanlivosti ložiska:

- mocnitel pro ložiska s čárovým stykem $p_{\text{čárový styk}} = \frac{10}{3}$

$$L = \left(\frac{Cr}{Pr}\right)^{p_{\text{čárový styk}}} = \left(\frac{10\,600 \cdot 10^3}{286\,145}\right)^{\frac{10}{3}} = 169\,459\ h \tag{3.91}$$

Ložiska nejsou cyklicky namáhána. Výsledná trvanlivost ložisek je dostačující a statická i dynamická únosnost mnohonásobně přesahuje působící sílu. Z důvodu rozsahu bakalářské tak jejich detailnější kontrola nebude provedena.

3.8 Utěsnění štítu

3.8.1 Zatěsnění po obvodu štítu

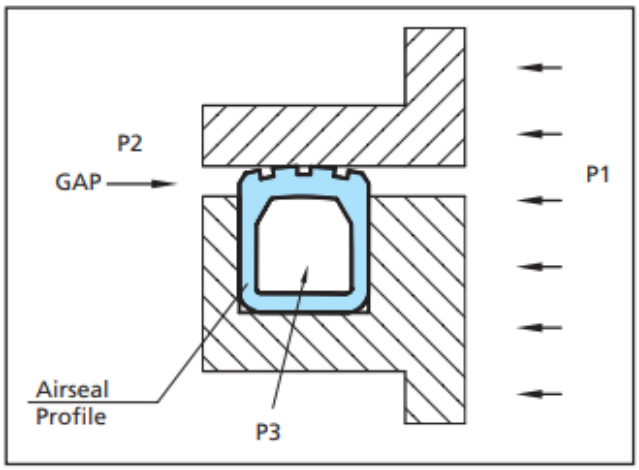
Kvůli obavám z prodření, odtržení, nebo jiného mechanického poškození těsnění při pohybu štítu bylo k jeho zatěsnění zvoleno nafukovací těsnění. Při konstrukčním návrhu těsnicího štítu bylo použito vysokotlaké nafukovací těsnění Airseal od firmy Trelleborg, které poskytuje dostatečnou tlakovou sílu pro utěsnění štítu s dostatečnou bezpečností. Výřez z katalogu pro dané těsnění a odkaz na stránku výrobce jsou uvedeny v příloze [12]. Při posouvání těsnicího štítu k vyrovnání hladin je toto těsnění vyfouknuto, čímž dochází k odlehčení štítu. Manipulace se samotným štítem je tak snazší, jelikož nedochází ke tření mezi žlabem a těsněním po celém obvodu těsnicího štítu. Riziko poškození těsnění je tak minimální. Pracovní dráha těsnicího štítu je ve žlabu lodního zdvihadla navíc opatřena oplátováním pro lepší dotěsnění a zamezení prodření o betonový žlab.

3.8.1.1 Kontrola zvoleného těsnění pro provozní tlak vody

Za maximální tlak, který působí na nafukovací těsnění, je uvažován hydrostatický tlak od největšího sloupce vody $h_3 = 6\,465\ mm$.

Pro následující výpočty jsou uvažovány dané konstanty:

- hustota vody $\rho = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$
- střední hodnota gravitačního zrychlení $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$



Obrázek 36.: Tlak působící na těsnění. [12]

$$p_1 = p_{max} = \rho \cdot g \cdot h_3 = 1\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 6{,}465 = 63\,421{,}65\ Pa \doteq 0{,}063\ MPa \tag{3.92}$$

$$p_2 = \text{úroveň atmosférického tlaku pro výpočet tlakového rozdílu} = 0\ MPa \tag{3.93}$$

Tlakový diferenciál Δp podél těsnění:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \doteq 0{,}063 - 0 \doteq 0{,}063\ MPa = 0{,}63\ bar \tag{3.94}$$

Podle katalogu výrobce [12] je tlak p_3 vhodné volit o $0{,}1 \div 0{,}13\ MPa$ $(1 - 1{,}37\ bar)$ vyšší, než je tlakový rozdíl podél těsnění (viz obr. 36).

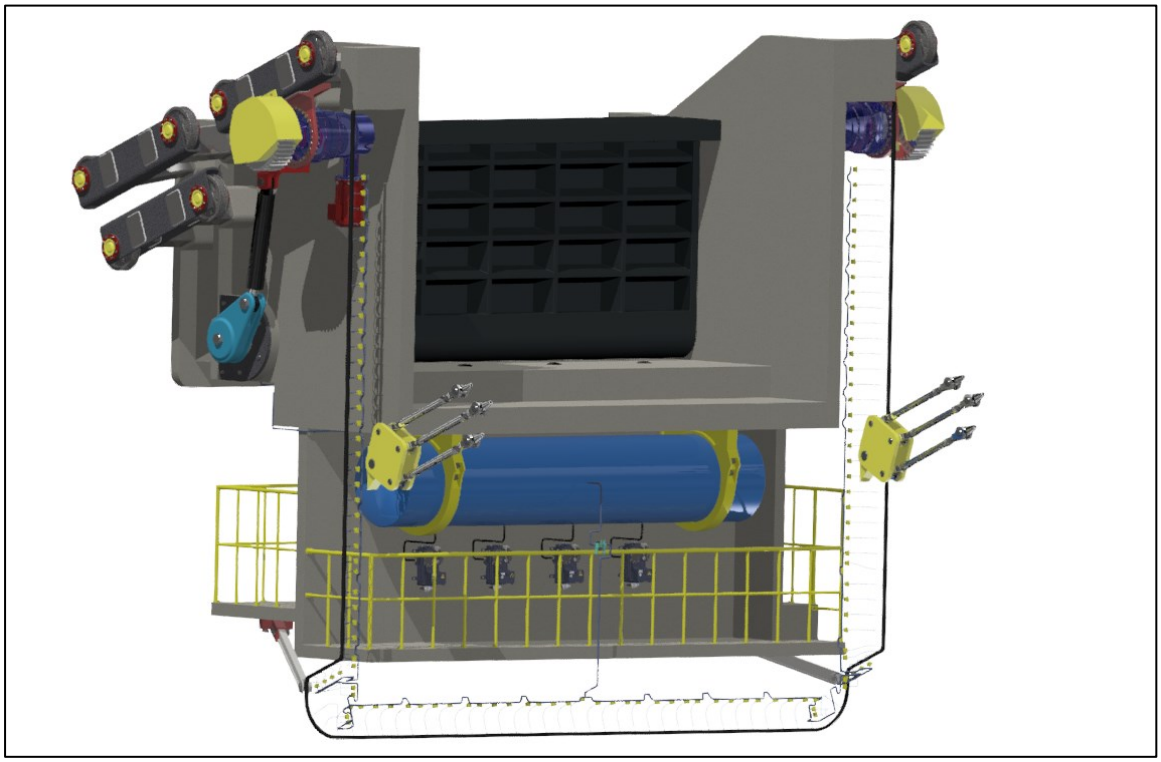
- z důvodu větší bezpečnosti je pro výpočet zvolen horní okraj tohoto rozmezí

$$p_3 \doteq 0{,}063 + 0{,}13 \doteq 0{,}193\ MPa \tag{3.95}$$

Maximální vnitřní tlak uvnitř těsnění udávaný výrobcem $p_i = 0{,}30\ MPa$ je tak dostatečný pro konstrukční řešení zvolené k utěsnění štítu.

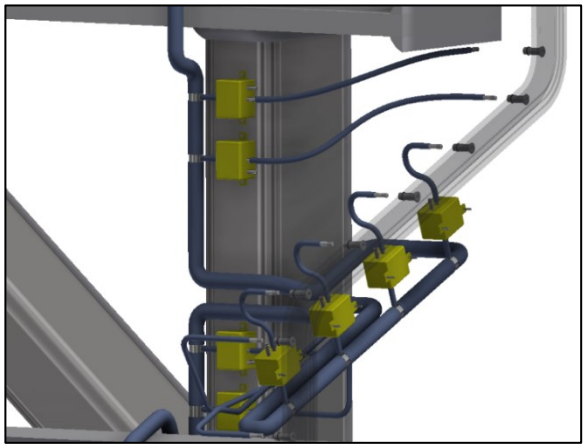
3.8.1.2 Konstrukční řešení zatěsnění štítu

Z důvodu rizika náhodného protržení nafukovacího těsnění je vhodné při zakázkové výrobě opatřit těsnění Trelleborg Airseal komorami. Při protržení tak nedojde k masivnímu průtoku vody podél celého obvodu těsnícího štítu.

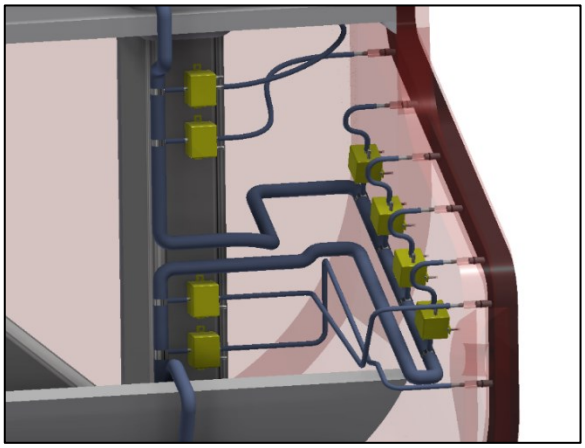


Obrázek 37.: Celkový pohled na rozvod vzduchu do jednotlivých komor těsnění.

Do jednotlivých komor je vzduch přiváděn z hlavního rozvodu pomocí vzduchových hubic umístěných v konstrukci těsnícího štítu. Ke každé hubici je veden samostatný vzduchový kanál tělem štítu, který je zakončen vzduchotěsným závitovým spojem s nátrubkem. Použity byly hubice taktéž od firmy Trelleborg, vhodné pro těsnění Airseal. Výřez katalogu pro daný produkt je uveden taktéž v příloze [12]. Na obrázcích 38 a 39 je vidět konstrukční návrh popsaného řešení přívodu vzduchu do jednotlivých komor těsnění.



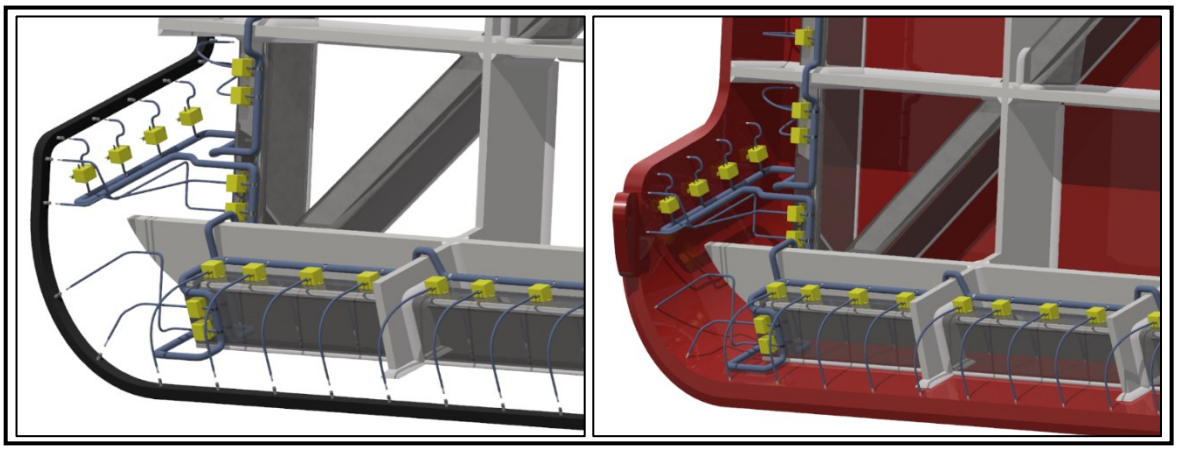
Obrázek 38.: Pohled na vzduchové hubice a nátrubky vedoucí do těla štítu při jeho zneviditelnění.



Obrázek 39.: Napojení komponentů na vzduchové kanály v těle štítu.

Na jednotlivé nátrubky spojené vzduchotěsným závitovým spojem k tělu štítu jsou přivedeny rozvodné hadice z dvoucestných ventilů. Přívody do jednotlivých komor nafukovacího těsnění je nutné opatřit právě těmito ventily k zajištění přívodu vzduchu do komory a následnému vypuštění před pohybem těsnícího štítu. Každý dvoucestný ventil je navíc pojištěn zpětným ventilem, který zabraňuje případnému úniku vzduchu z komory při jeho selhání. Tento konstrukční návrh je vidět taktéž na obrázcích 38, 39 a 40.

Tlak v komorách nafukovacího těsnění je monitorován a průběžně udržován ze vzduchového zásobníku, který je tlakován kompresory (viz obr. 37).



Obrázek 40.: Detailní pohled na rozvod vzduchu do komor těsnění.

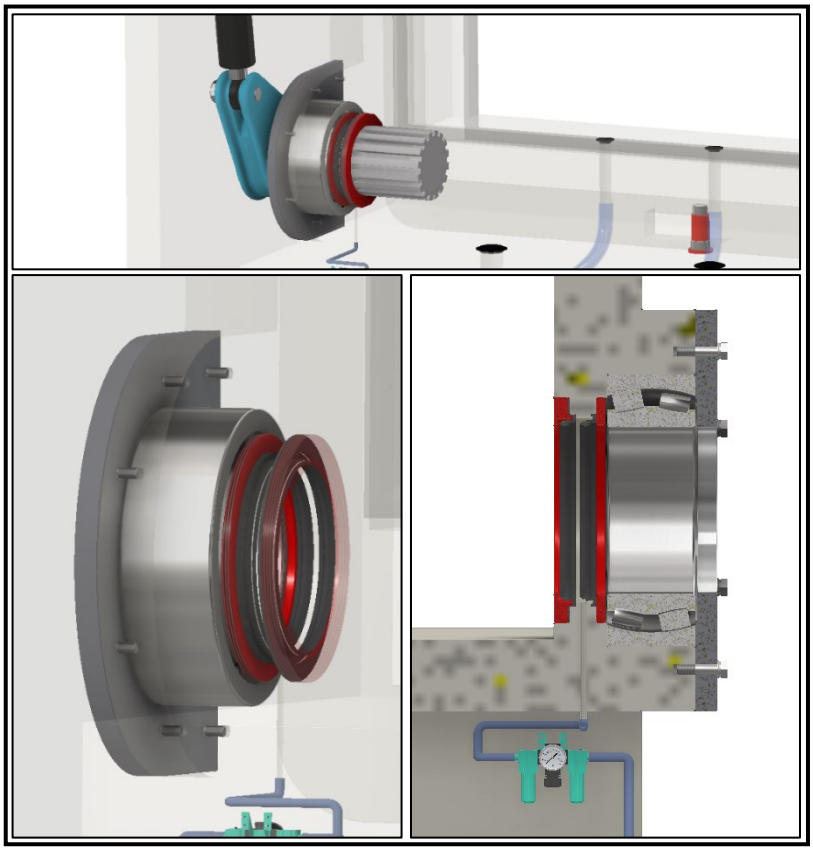
3.8.2 Utěsnění vrat

Vrata jsou po celém svém obvodu opatřena pryžovým těsněním, které je po dovření vrat písty zcela utěsní proti unikání vody z přehrady.

3.8.2.1 Utěsnění hřídelů vrat

Konstrukční řešení zatěsnění hřídelů sklopných vrat těsnícího štítu bylo navrženo s ohledem na způsob utěsnění lodních hřídelů produktem Supreme Standard od firmy Lagersmit. Schéma principu utěsnění lodních hřídelů tímto produktem spolu s odkazem na stránky výrobce jsou uvedeny v příloze [13].

Z důvodu limitovaných rozměrů dráhy a plavební šířky je kompaktnost dosažena vytvarováním samotné stěny vany těsnicího štítu pro dvě, na zakázku speciálně vyrobená gufera, pojistná víčka a ložiska. Při sestavení se jedno gufero vloženo z vnitřní strany vany. Následně je zajištěno víčkem s vnějším závitem, které je zatěsněno pryžovým těsněním. Druhé gufero je vloženo z vnější strany štítu a je taktéž dotaženo víčkem. Po utažení víček je namontována hřídel se soudečkovým ložiskem a celý komplet je dotažen vnějším víkem zabraňujícím posuvu této sestavy v axiálním směru. Do prostoru mezi gufera je vháněn vzduch ze vzduchového zásobníku a dochází tak k jeho přetlakování. Konstrukční návrh utěsnění hřídelů vrat je uveden na obr. 41.



Obrázek 41.: Utěsnění hřídelů vrat.

4. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout konstrukční řešení šikmého těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla na Orlické přehradě, ke kterému dosedá pohyblivá vana pro přepravu lodí napuštěná vodou. Tento projekt z předmětu SK4 se jevil na první pohled jako téma pro bakalářskou práci velmi zajímavý. Ve skutečnosti však bylo potřeba řešit až příliš mnoho konstrukčních úkolů a problémů. Kompletní konstrukce celého těsnicího štítu se tak stala značně problematickou. Při vymýšlení konstrukčního návrhu a jeho realizaci docházelo neustále ke komplikacím, kdy se při vyřešení jednoho problému objevilo hned několik problémů dalších. I za rok a půl intenzivní práce bylo velmi obtížné navrhnout a detailně vymodelovat každý z komponentů pro funkční řešení a dovést tak celý projekt do zdárného konce. Při tvorbě 3D modelu bylo v rámci možností cíleno na detailní návrh a funkci všech podstatných součástí těsnicího štítu. Celkový komplet je velmi rozsáhlý, složitý a zahrnuje konstrukční řešení z různých technických odvětví. Konstrukční návrh byl zaměřen na celkovou konstrukci šikmého těsnicího štítu, jeho utěsnění a vyvážení. Dále bylo navrženo pojezdové ústrojí s pohonnou jednotkou k zajištění pohybu šikmého těsnicího štítu a zabránění jeho překlápění. Z důvodu značného rozsahu celkové sestavy, která se skládá z více jak 7 000 komponentů, nebylo možné zabývat se všemi částmi a detaily této rozsáhlé sestavy.

Seznam použité literatury

[1] GABRIEL, Pavel. *Vodní cesty*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1997, 170 s. ISBN ISBN 80-01-01570-X.

[2] *Vodní cesty a plavba* [online]. , 44 s. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://www.vltava-resort.cz/www/vltavaresort/fs/vcap_3_2017.pdf

[3] Lodní zdvihadlo Strépy - Thieu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Str%C3%A9py-Thieu_boat_lift

[4] Lodní zdvihadlo Saint-Louis-Arzviller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Saint-Louis-Arzviller_inclined_plane

[5] Lodní zdvihadlo Falkirk Wheel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Falkirk_Wheel

[6] *SIGMA SHOP: Katalogový list čerpadla SIGMA 65-CVX-160-15-3-LC-000-1* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.sigmashop.cz/cerpadlo-sigma-65-cvx-160-15-3-lc-000-1

[7] *BMC-TECH: Katalog jeřábový kol a podvozků SIBRE* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://bmc-tech.cz/download/37053_jerabova-kola-a-podvozky-sibre-jerabova-kola-a-podvozky-sibre.pdf

[8] *SEW - EURODRIVE: Technické údaje - třífázový motor DRN132L4/FF (IE3)* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.sew-eurodrive.cz/os/c/main.do?country=CZ&language=cs_CZ&addon=BASKET&viewset=BASKET&action=READ_TRANSFER_SERVICE&g=F4E9D47F1DE21EDCB1C429507413C0DB

[9] *WIKOV Orbi-fleX® Calculator: Planetová převodovka Orbi - flex 3PB-120-0560-Fxx-Dx0x* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.gearboxconfigurator.com/orbiflex

[10] HRABOVSKÝ, Leopold a Pavel VRANÍK. *Dopravní a manipulační systémy*. Druhé revidované. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2017, 117 s. ISBN 978-80-248-3255-5. Dostupné také z: https://issuu.com/michdor/docs/m1_text

[11] *SKF: Soudečková ložiska* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-24180%20ECA%2FW33?system=metric

[12] *TRELLEBORG Sealing Solutions: Airseal* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.trelleborg.com/cs-cz/seals/products-and-solutions/static-seals/airseal

[13] *LAGERSMIT: SUPREME® STANDARD* [online]. In: . [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.lagersmit.com/products/supreme-standard/

[14] Lodní zdvihadlo Strépy - Thieu. In: *Imgur* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://imgur.com/gallery/MUNpWeu

[15] Lodní zdvihadlo na přehradě Tři soutěsky. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99i_sout%C4%9Bsky_(hr%C3%A1z)#/media/Soubor:ThreeGorgesDam-China2009.jpg

[16] Krasnojarské šikmé lodní zdvihadlo. In: *Wikimapia* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: http://wikimapia.org/8022618/Boat-lift#/photo/2200203

[17] Lodní zdvihadlo Saint-Louis-Arzviller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Arzviller_plan_incline_01.jpg

[18] Lodní zdvihadlo Falkirk Wheel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Falkirk_Wheel#/media/File:FalkirkWheelSide_2004_SeanMcClean.jpg

[19] Andertonský lodní výtah. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Andertonsk%C3%BD_lodn%C3%AD_v%C3%BDtah

Seznam obrázků

Obrázek 1.: Vana s lodí přiražená na těsnicí štít. 2
Obrázek 2.: Pracovní rozmezí hladin vody. 2
Obrázek 3.: Andertonský lodní výtah. [19] 4
Obrázek 4.: Lodní zdvihadlo Strépy – Thieu. [14] 5
Obrázek 5.: Lodní zdvihadlo na přehradě Tři soutěsky. [15] 5
Obrázek 6.: Šikmé lodní zdvihadlo Arzviller s příčně uloženým žlabem. [17] 6
Obrázek 7.: Krasnojarské šikmé lodní zdvihadlo s podélně uloženým žlabem. [16] 7
Obrázek 8.: Rotační lodní zdvihadlo Falkirk Wheel. [18] 8
Obrázek 9.: Schématické znázornění sil působících na těsnicí štít a dané rozměry. 9
Obrázek 10.: Výšky hladin pro výpočty. 11
Obrázek 11.: Rozklad působících sil do x-ové a y-ové složky. 13
Obrázek 12.: Zatěsnění štítu a pohyblivé vany pomocí háků. 16
Obrázek 13.: Konstrukce štítu. 17
Obrázek 14.: Kanálky v těle štítu pro přívod vzduchu do nafukovacího těsnění. 17
Obrázek 15.: Umístění čerpadel, kompresorů a vzduchového zásobníku. 18
Obrázek 16.: Potrubí vyrovnávací komory. 19
Obrázek 17.: Vzpěry štítu. 19
Obrázek 18.: Pojezdy vany štítu. 20
Obrázek 19.: Pojezdové ústrojí. 21
Obrázek 20.: Nosná konstrukce s kolejnicí. 22
Obrázek 21.: Vyvážení těsnicího štítu. 23
Obrázek 22.: Koš se závažími. 24
Obrázek 23.: Uchycení ocelových lan ke štítu pomocí lanových napínáků. 24
Obrázek 24.: Vedení ocelových lan přes kladky. 24
Obrázek 25.: Oplátování protizávaží k zamezení působení vztlakové síly v určitých pracovních polohách šikmého těsnicího štítu. 25
Obrázek 26.: Hnací jednotka připevněná na nosník pojezdů. 26
Obrázek 27.: Záběr ozubeného kola s ozubeným hřebenem, který je umístěn po celé pracovní délce těsnicího štítu. 26
Obrázek 28.: Působení reakcí v provozním stavu. 27
Obrázek 29.: Sklopná vrata v uzavřené a otevřené poloze. 30
Obrázek 30.: Návrh tvaru vidlice. 30
Obrázek 31: Uložení pístu. 31
Obrázek 32.: Zatížení hřídelí vrat. 32
Obrázek 33.: Schéma zatížení pro střih hřídele. 33
Obrázek 34.: Ohyb hřídele. 34
Obrázek 35.: Zatížení ložisek. 36
Obrázek 36.: Tlak působící na těsnění. [12] 37
Obrázek 37.: Celkový pohled na rozvod vzduchu do jednotlivých komor těsnění. 38

Obrázek 38.: Pohled na vzduchové hubice a nátrubky vedoucí do těla štítu při jeho zneviditelnění. 39
Obrázek 39.: Napojení komponentů na vzduchové kanály v těle štítu. 39
Obrázek 40.: Detailní pohled na rozvod vzduchu do komor těsnění. 39
Obrázek 41.: Utěsnění hřídelů vrat. 40

Seznam příloh

Příloha 1. Příloha katalogových listů použitých komponentů a produktů, jejichž základ byl použit při konstruování těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla.
Příloha 2. Příloha obrázků konstrukčního návrhu celkové sestavy těsnicího štítu.
Příloha 3. CD s elektronickou verzí bakalářské práce, 3D modelem šikmého těsnicího štítu a posterem.

FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Příloha katalogových listů použitých komponentů a produktů, jejichž základ byl použit při konstruování těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Tomáš STANĚK

1. Katalogový list odstředivého čerpadla SIGMA 65-CVX-160-15-3-LC-000-1 [6] 2
2. Katalogový list jeřábových pojezdů SIBRE Wheelset SRAE 500 [7] 3
3. Katalogový list motoru SEW EURODRIVE s označením DRN132L4/FF [8] 4
4. Katalogový list planetové převodovky Wikov Orbi-flex 3PB-120-0560-Fxx-Dx0x [9] 5
5. Katalogový list soudečkových ložisek SKF 24180 ECA/W33 [11] 7
6. Katalogový list nafukovacího těsnění Trelleborg Airseal [12] 9
7. Produkt Lagersmit Supreme Standard [13] 12

1. Katalogový list odstředivého čerpadla SIGMA 65-CVX-160-15-3-LC-000-1 [6]

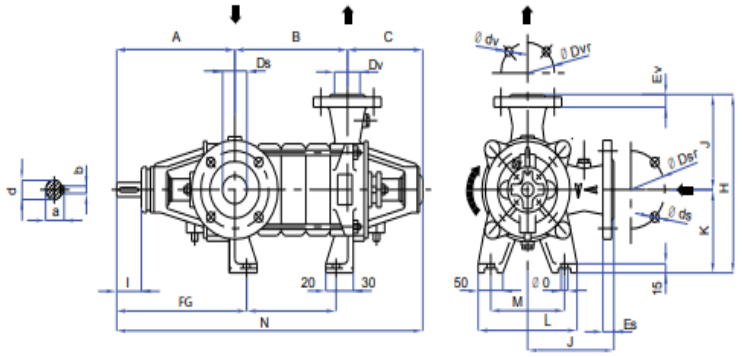
- https://www.sigmashop.cz/cerpadlo-sigma-65-cvx-160-15-3-lc-000-1

Odstředivá, radiální článková, horizontální čerpadla řady CVX

Čerpadlo 65-CVX

Q [l.s⁻¹]	NPSHR (Δh_{dov}) [m]	[m] [kW]	Počet stupňů 2	3	4	5	6
Provedení x2 – standardní stočení kol 2.stupně							
9	2,3	H	46	80	113	147	180
		P	7,4	12,5	17,6	22,8	27,9
14	3,2	H	40	70	100	130	160
		P	8,4	14,7	21,1	27,4	33,8
18	4,6	H	33	60	87	114	141
		P	9,6	17,1	24,5	32	39,4
Provedení x1 – standardní stočení kol 1.stupně							
9	2,3	H	57	90	124	158	191
		P	8,9	14	19,2	24,3	29,4
14	3,2	H	50	80	110	140	170
		P	10,7	17,1	23,4	29,8	36,1
18	4,6	H	44	71	98	125	152
		P	12,3	19,7	27,2	34,6	42,1
Provedení x0 – plná oběžná kola							
9	2,3	H	67	101	135	168	202
		P	102	15,4	20,5	25,6	30,7
14	3,2	H	60	90	120	150	180
		P	12,7	19,1	25,4	31,8	38,1
18	4,6	H	54	81	108	135	162
		P	14,9	22,4	29,8	37,3	44,7
Hmotnost	m	[kg]	63,7	72	80,3	89	97,8
M. setr.	I_x	[kg.m²]	0,0120	0,0173	0,0226	0,0281	0,0334

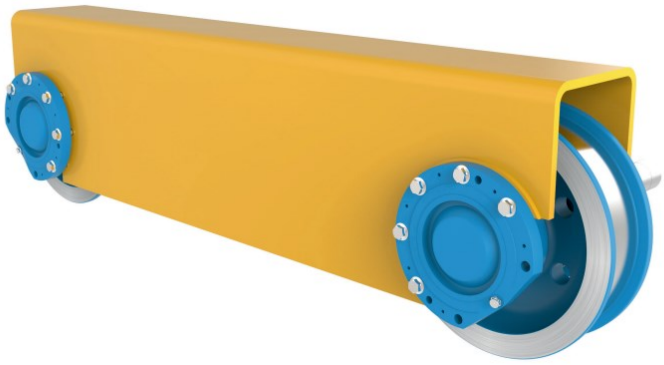
Rozměrový náčrtek



TYP	ST.	A	B	C	DV DN	DV PN	Dvr	dv	Ev	Ds DN	Ds PN	Dsr	ds	Es	F	G	H	J	K	L	M	N	O	a	b	d	l	m [kg]
40-CVX-125-8	2		160													120						525						34,6
	3		210													170						575						38,1
	4		260	150												220						625						41,6
	5		310													270						675						45,1
	6	215	360		40	25	110	4 x 18	20	50	16	125	4 x 18	20	235	320	292	160	132	160	210	725	14	24,5	6	22	35	48,6
	7		410													370						790						52,1
	8		460	165												420						840						55,7
	9		510													470						890						58,4
	10		560													520						940						63
50-CVX-160-10	2		185													145						595						51
	3		240	170												200						650						57,4
	4	240	295		50	25	125	4 x 18	22	65	16	145	4 x 18	20	260	255	360	200	160	212	265	705	14	30,5	8	28	50	63,7
	5		350	190												310						780						70,5
	6		405													365						835						76,4
65-CVX-160-15	2		250													210						725						63,7
	3		330	195												290						805						72
	4	280	410		65	25	145	8 x 18	24	80	16	160	4 x 18	22	300	370	360	200	160	212	262	885	18	35,3	10	32	60	80,3
	5		490	210												450						980						89
	6		570													530						1060						97,8

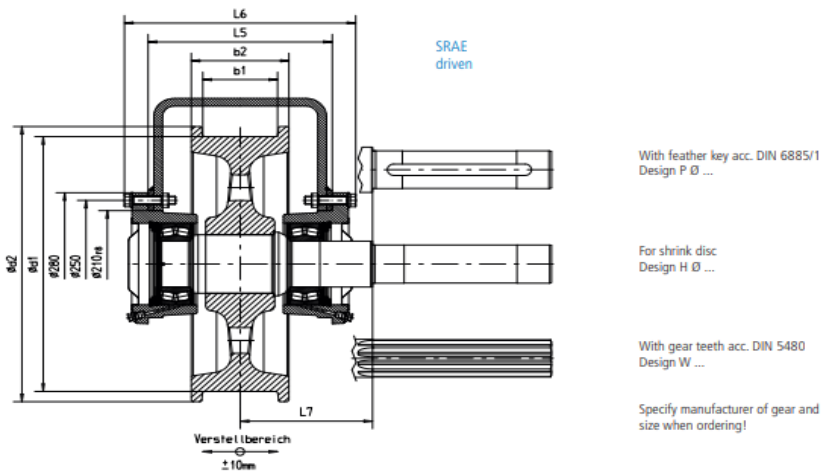
2. Katalogový list jeřábových pojezdů SIBRE Wheelset SRAE 500 [7]

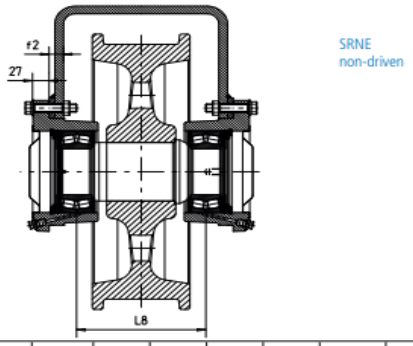
- https://bmc-tech.cz/download/37053_jerabova-kola-a-podvozky-sibre-jerabova-kola-a-podvozky-sibre.pdf



Crane Wheel Systems SRA / SRN — SIBRE — **M 1501 406 E-EN-2014-08**

Wheelset SRAE / SRNE 400 . 500 (Corner hinge assembly) — Option 1 and 2





ø d1 h9	b1	b2	ø d2	f2	L5	L6	L7[1] Standard	L8	Roller bearing	Drive shaft max. ø	Weight kg [2]	
											SRAE	SRNE
400	60 - 90	125	440	15 - 32	280	362	210	182	22315	75	136	126
	85 - 105	140									142	132
500	60 - 100	140	540	20 - 32	320	402	230	224,6	23218	90	195	180
	95 - 130	170									209	193

1) Other dimensions on request
2) Depending on type of wheel

Alterations reserved
SIBRE - Siegerland Bremsen GmbH

Zastoupení pro Českou republiku: BMC-TECH www.bmc-tech.cz info@bmc-tech.cz | +420 545 226 047 jeřábová kola

3. Katalogový list motoru SEW EURODRIVE s označením DRN132L4/FF [8]

- https://www.sew-eurodrive.cz/os/catalog/products/drives/acgearmotor/default.aspx?language=cs__CZ&country=CZ

Informace o výrobku

SEW EURODRIVE

Označení

DRN132L4/FF
Třífázové motory DRN.. (IE3)

Produktová data

Jmenovité otáčky motoru	[1/min]	: 1470
Typ konstrukce		: B5
Vrchní nátěr dle RAL		: 7031 Blue gray (51370310)
Poloha konektoru/svorkové skříně	[°]	: 0
Kabelový přívod/poloha konektoru		: X
Výstupní hřídel	[mm]	: 38X80
Průměr příruby	[mm]	: 300
Výkon motoru	[kW]	: 9,2
Doba zapnutí		: S1-100%
Třída účinnosti		: IE3
Účinnost (50/75/100% Pn)	[%]	: 90,84 / 91,59 / 91
Značka CE		: ano
Napětí motoru	[V]	: 400/690
Schéma zapojení		: R13
Frekvence	[Hz]	: 50
Jmenovitý proud	[A]	: 18,7 / 10,8
Cos fí		: 0,77
Tepelná třída		: 155(F)
Krytí motoru		: IP55
Konstrukční předpis		: Evropa (CE)
Moment setrvačnosti (vztažený na vstupní stranu)	[10^{-4} kgm^2]	: 439,00
hmotnost	[kg]	: 81,00

Doplňková provedení

Výstupní hřídel: 38X80 mm
Tepelná třída 155(F)
Krytí IP 55

4. Katalogový list planetové převodovky Wikov Orbi-flex 3PB-120-0560-Fxx-Dx0x [9]

- https://www.gearboxconfigurator.com/orbiflex

WIKOV

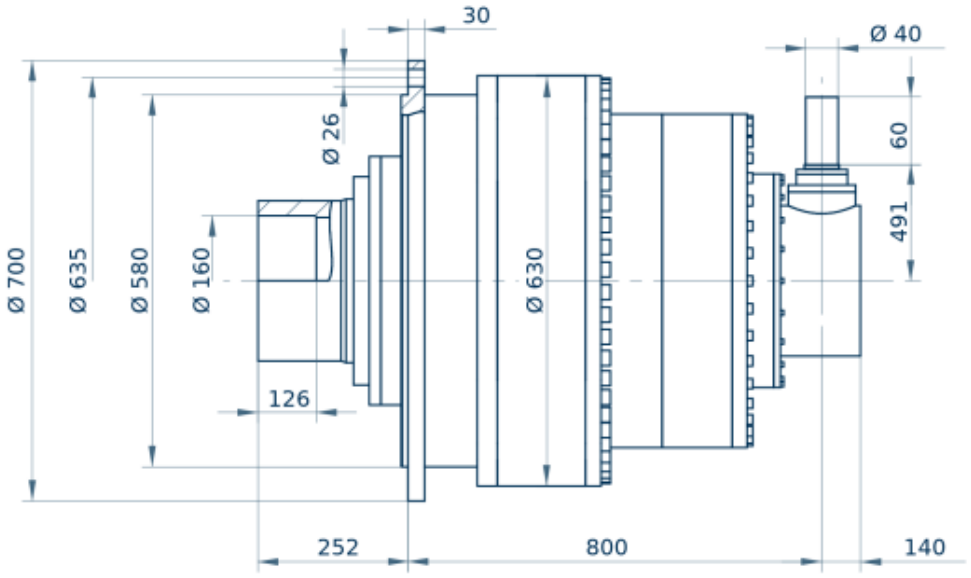
Orbi-flex®

3PB-120-0560-Fxx-Dx0x	
Gearbox parameters	
Gearbox type	Bevel stage input
Power	9.20 kW
Application factor required	1.50
Application factor calculated	2.99
Required ratio	588.00
Real ratio	562.45
Deviation	-4.35 %
Speed - high speed shaft	1,470.00 RPM
Speed - low speed shaft	2.61 RPM
Torque - high speed shaft	0.06 kNm
Torque - low speed shaft	33.61 kNm
Static peaks per hour	
Static torque - low speed shaft	
Gearbox rated torque	105.00 kNm
Gearbox static torque capacity	210.00 kNm
Required bearing life	
Planet bearing life	100,000 hours
Cooling units requirements	0.37 kW
Industry	Lifting equipment
Driven machine	Jack-ups for platforms and lift boats
Effective operating period per day	
Starts per hour	
Prime mover	
Gearbox position pitch angle	0°
Gearbox position roll angle	0°
Mounting arrangement	
Preferred lubrication	
Low speed shaft design	
High speed shaft design	

3PB-120-0560-Fxx-DxOx	
Gearbox weight	1,150 kg
Climate	
Elevation	
Dusty environment	Yes
Explosive environment	No
Offshore environment	No
Requested accessories	
Lubrication unit	No
High speed coupling	No
Low speed coupling	No
Back stop	No
Safety brake	No

WIKOV

Orbi-flex®



5. Katalogový list soudečkových ložisek SKF 24180 ECA/W33 [11]

- https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-24180%20ECA%2FW33?system=metric

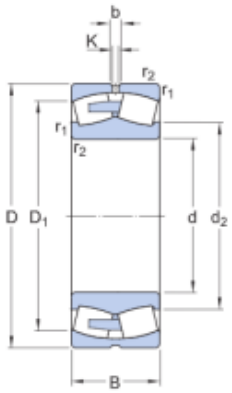
SKF. Získáno z {místo} dne {datum}

24180 ECA/W33

- Oblíbená položka
- SKF Explorer

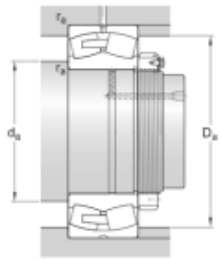
Soudečková ložiska

Technické údaje



ROZMĚRY

d	400 mm	Průměr díry
D	650 mm	Vnější průměr
B	250 mm	Šířka
d_2	≈ 467 mm	Průměr nákružku vnitřního kroužku
D_1	≈ 559 mm	Průměr nákružku/zápichu vnějšího kroužku
b	22.3 mm	Šířka mazací drážky
K	12 mm	Průměr mazacího otvoru
$r_{1,2}$	min. 6 mm	Rozměr sražení hran



PŘIPOJOVACÍ ROZMĚRY

d_a	min. 426 mm	Průměr opěrné plochy hřídele
D_a	max. 624 mm	Průměr opěrné plochy tělesa
r_a	max. 5 mm	Poloměr zaoblení

SKF. Strana {strana} z {celkem}

SKF

Získáno z {místo} dne {datum}

DATA VÝPOČTU

Základní dynamická únosnost	C	6 331 kN
Základní statická únosnost	C_0	10 600 kN
Mezní únavové zatížení	P_u	735 kN
Referenční otáčky		340 r/min
Mezní otáčky		500 r/min
Mezní hodnota	e	0.37
Součinitel axiálního zatížení	Y_1	1.8
Součinitel axiálního zatížení	Y_2	2.7
Součinitel axiálního zatížení	Y_0	1.8

HMOTNOST

Hmotnost	320 kg

6. Katalogový list nafukovacího těsnění Trelleborg Airseal [12]

- https://www.trelleborg.com/cs-cz/seals/products-and-solutions/static-seals/airseal

Airseal

Applications in Detail

Technical Data
Airseals can be used for a wide range of applications. The seal and material selection are determined by pressure requirements, temperature and medium to be sealed.

With a good surface finish on the groove and mating surface, a dynamic vacuum of 10^{-3} Torr can be safely handled.

Internal Pressure of Airseal
The maximum permissible internal pressure is dependent on:

- Profile cross-section
- Seal gap
- Chambering
- Design

In an uninstalled state, the Airseal may be subjected to a maximum test pressure of 0.1 MPa (1 bar).

Gap Expansion Definition
The sealing gap is a major factor in the design of an inflatable product. The gap information listed for each profile assumes that the pressure differential across the seal is 0 MPa (0 bar) and the configuration is either radially expanding outward or axially expanding.
For inflation inward applications, the gap must be reduced to ensure that the seal does not wrinkle. Fabric Reinforcement profiles (more detail on page 20 to 25) are not recommended for inflation inward applications.

The illustration below demonstrates a typical sealing application and the information required in order to make the right profile choice. As a general rule, inflation pressure (P3) is 0.1-0.13 MPa (1-1.37 bar) higher than the pressure differential.

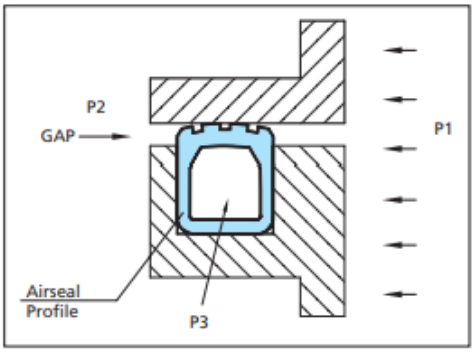


Figure 2 Pressure on Airseal

Gap = Clearance between deflated seal and opposing surface

P1 = Pressure inside equipment

P2 = Outside (atmosphere)

P3 = Inflation pressure

Pressure Differential = P1-P2

Example 1:
If P1 = atmosphere and P2 = atmosphere, then the pressure differential across the seal = 0 MPa (0 bar). The recommended inflation pressure for the seal would then be 0.1 MPa (1 bar). In this case, we would recommend any of our low-pressure non-reinforced profiles on page 14, 15 and 18, 19.

Example 2:
If P1 = 0.17 MPa (1.7 bar) and P2 = atmosphere, then the pressure differential across the seal = 0.17 MPa (1.7 bar). Recommended inflation pressure (P3) in this instance would then be 0.3 MPa (3 bar). For this application, we would recommend either a low-pressure fabric reinforced profile as seen on pages 16 and 17 or the high-pressure profiles on pages 26 through 29 if the gap is low.

Temperature
The temperature range depends on the seal material used. The limits lie between -60°C and +200°C (-76°F and +392°F).

Media
The media resistance is also dependent on the selected seal material. The table on page 7 shows the available materials.

Latest information available at www.tss.trelleborg.com
Edition September 2012

TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS

5

Airseal

■ **High-Pressure Types – with Smooth Sealing Profile and Grooves Without Fabric Reinforcement – METRIC Dimensions**

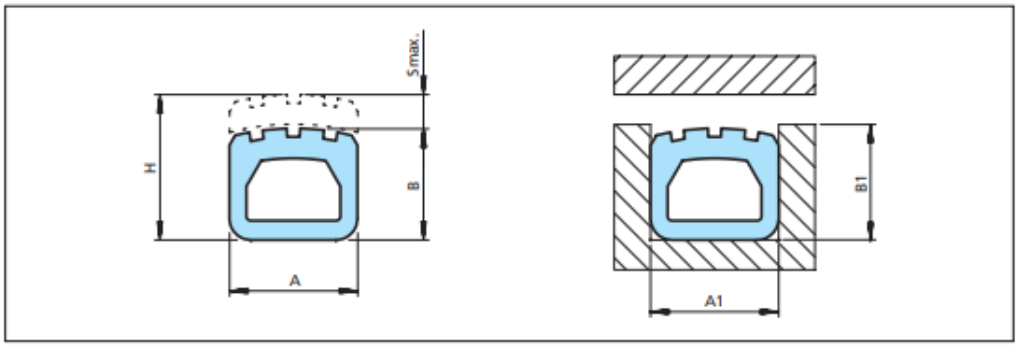


Figure 24 High-Pressure – with smooth sealing profile and grooves

Table 27 Dimensions and Profile Numbers – METRIC Dimensions

Profile Ref. No.		Dimensions					
VMQ	EPDM	A x B	A1	B1	H	S max.	Max. Internal Pressure Pi MPa*
15092-5	15092-6	14.00 x 10.00	15.00	10.70	13.00	3.00	0.30
950-5	950-6	16.00 x 12.00	17.00	12.80	15.00	3.00	0.30
960-5	960-6	16.00 x 18.00	16.80	19.00	21.50	3.50	0.30
955-5	955-6	22.00 x 19.00	24.00	11.70	22.50	3.50	0.30
952-5	952-6	26.00 x 19.00	27.30	20.00	23.50	4.50	0.30
949-5	-	27.00 x 21.00	29.60	22.00	26.00	5.00	0.30
972-5	972-6	35.00 x 26.00	36.30	27.30	34.00	8.00	0.30
6119-5	6119-6	35.00 x 32.00	36.30	33.30	42.00	10.00	0.30

* Higher pressures are possible dependent on application, function and material. For further details please contact your local Trelleborg Sealing Solutions marketing company.

Table 28 Recommended Minimum Radii in Metric Dimensions and Valve Connections

Profile Ref. No.	Radii			Air Connectors (min. - max.)			
	R axial	RO	RI	AC13-Ø	AC10	AC12	AC11-Ø
15092	44.45	34.80	44.45	4-6	M4-M6	M6	6
950	41.15	41.15	50.80	4-8	M4-M8	M6-M8	6-8
960	21.75	53.85	82.55	4-8	M4-M8	M6-M8	6-8
955	60.20	41.15	63.50	4-8	M4-M8	M6-M8	6-8
952	67.56	60.20	85.60	4-10	M4-M10	M6-M10	6-10
949	61.00	65.00	106.00	4-10	M4-M10	M6-M10	6-10
972	83.00	70.00	101.00	4-16	M4-M16	M6-M14	6-12
6119	85.60	76.20	117.35	4-16	M4-M16	M6-M14	6-12

26 TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS

Latest information available at www.tss.trelleborg.com
Edition September 2012

Airseal

Metal Air Connections

The air connections and valves can generally only be provided on the bottom surface of the profile on Airseals. With some profiles it is possible to vulcanize the connections into the side wall. Please contact Trelleborg Sealing Solutions for standard stem designs to avoid tooling cost wherever possible.

Metal Air Connection Sizes – METRIC Dimensions

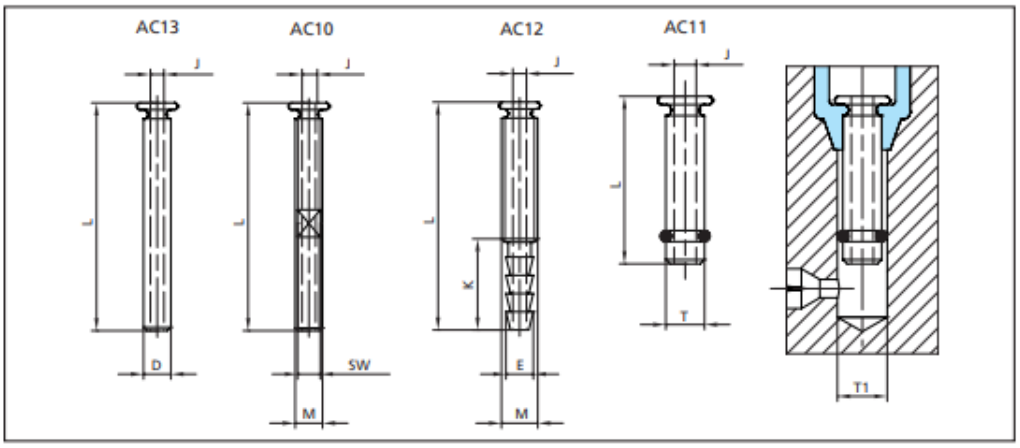


Figure 31 Form of standard connections

Table 39 Connections - METRIC Dimensions

Type	Connections Dimensions							
AC13	Ø D	4	6	8	10	12	14	16
	Ø J	1.52	3.17	3.98	5.94	6.35	7.13	7.92
	L	50	50	60	70	70	80	80
AC10	M	M4	M6	M8	M10	M12	M14	M16
	SW	3	5	6	8	10	11	13
	Ø J	1.52	3.17	3.98	5.53	7.13	7.92	9.52
	L	50	50	60	70	70	80	80
AC12	M	M4	M6	M8	M10	M12	M14	
	Ø E	2.7	4	6	8	10	12	
	K	8	12	20	20	25	25	
	Ø J	1.02	1.52	2.94	3.98	5.94	6.35	
	L	50	50	60	70	70	80	80
AC11	Ø T h7	3.8	5.8	7.8	9.8	11.8		
	Ø T1 H8	4	6	8	10	12		
	Ø J	1.52	2.18	3.98	6.04	7.92		
	L	20	25	30	30	30		

Table 40 Cones - METRIC Dimensions

Cones	Connection Type			
m x n x h	AC13	AC10	AC12	AC11
6 x 5 x 3* 8 x 6 x 4	D4	M4	-	4
12 x 10 x 6	D6	M6	M6	6
14 x 12 x 6	D8	M8	M8	8
21 x 14 x 10	D10	M10	M10	10
24 x 16 x 10	D12	M12	M12	12
26 x 18 x 12	D14	M14	M14	-
28 x 20 x 12	D16	M16	-	-

* For profile 6.5 x 5 (973)

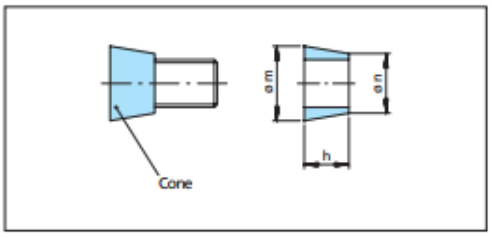
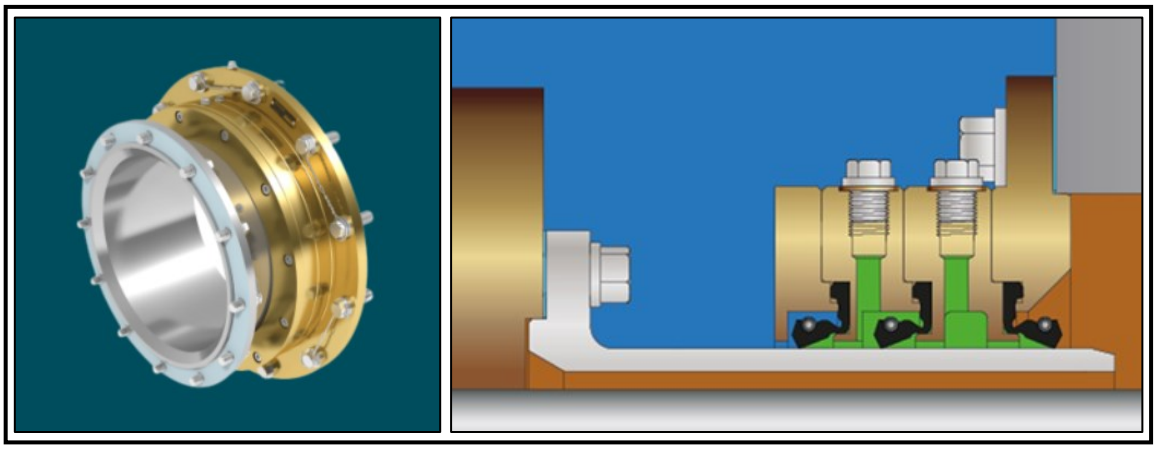


Figure 32 Cone configuration

7. Produkt Lagersmit Supreme Standard [13]

- https://www.lagersmit.com/products/supreme-standard/



FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Příloha obrázků konstrukčního návrhu celkové sestavy těsnicího štítu

Značná část práce při návrhu těsnicího štítu dráhy lodního zdvihadla spočívá v konstrukčním návrhu a vytvoření funkčního 3D modelu. Z důvodu rozsahu obsahuje bakalářská práce pouze základní pohledy na řešené konstrukční prvky, které jsou potřebné pro názornou představu při popisu návrhu. V této příloze jsou uvedeny detailnější obrázky vytvořeného 3D modelu celkové sestavy těsnicího štítu. Samotný 3D model je k bakalářské práci přiložen v elektronické podobě.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Tomáš STANĚK

Celková sestava konstrukce těsnicího štítu. 3

Celková sestava konstrukce těsnicího štítu. 4

Čerpadla s potrubím pro napouštění a vypouštění vyrovnávací komory. 5

Vzduchový zásobník s kompresory. 6

Kostra těsnicího štítu bez oplátování. 7

Konstrukce těsnicího štítu s rozvodem vzduchu do nafukovacího těsnění. 8

Rozklad konstrukce těsnicího štítu. 9

Rozvody vzduchu do jednotlivých komor nafukovacího těsnění opatřené zpětnými ventily. 10

Rozvody vzduchu do jednotlivých komor nafukovacího těsnění přes kanály v těle těsnicího štítu. 11

Pojezdové ústrojí celkové sestavy těsnicího štítu. 12

Pojezdové ústrojí celkové sestavy těsnicího štítu. 13

Dráha lodního zdvihadla osazená kompletně navrženým těsnicím štítem. 14

Dráha lodního zdvihadla osazená kompletně navrženým těsnicím štítem. 15

Dráha lodního zdvihadla osazená kompletně navrženým těsnicím štítem. 16

Funkční celek navržený v bakalářské práci k utěsnění dráhy lodního zdvihadla. 17

Oplátování pracovní dráhy těsnicího štítu. 18

Konstrukční návrh pojezdového ústrojí k zajištění pohybu a zabránění překlápění sestavy šikmého těsnicího štítu. 19

Záběr ozubeného kola s ozubeným hřebenem a konstrukční návrh zajištění sestavy těsnicího štítu proti překlápění horním pojezdem s kolejnicí. 20

Pojezdové ústrojí. 21

Hnací jednotka připevněná na nosník pojezdů. 22

Sestava pojezdu těsnicího štítu s řezem jeřábovými pojezdy. 23

Konstrukční návrh uložení hřídelů vrat a jejich utěsnění. 24

Vyvážení těsnicího štítu. 25

Návrh celkové sestavy vyvážení těsnicího štítu. 26

Oplátování protizávaží k zamezení působení vztlakové síly v určitých pracovních polohách šikmého těsnicího štítu. 27

Vodící konstrukce protizávaží. 28

Uchycení kladek pro ocelová lana protizávaží do dráhy lodního zdvihadla. 29

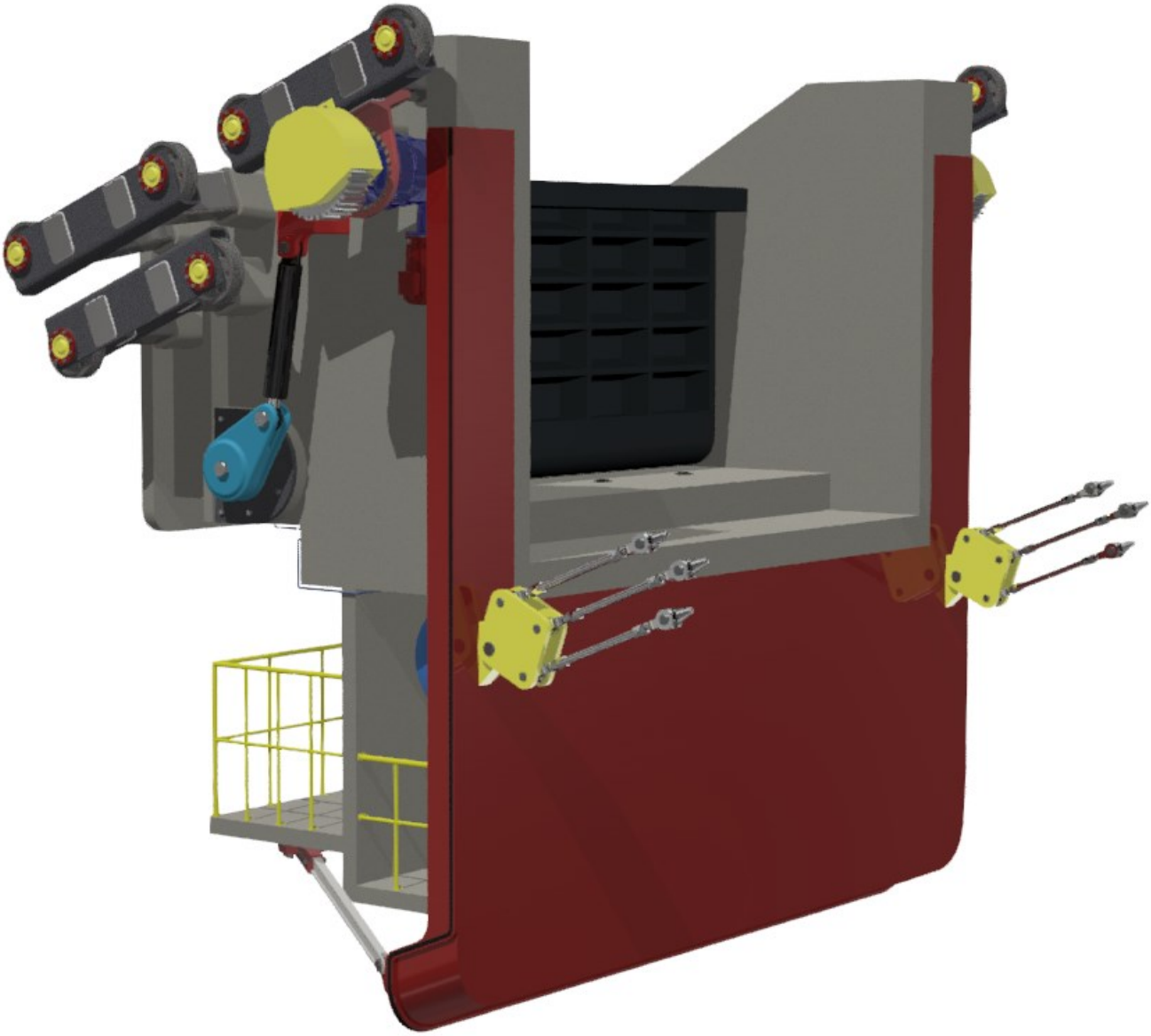
Uchycení ocelových lan každého z protizávaží ke štítu pomocí lanových napínáků. 30

Protizávaží o hmotnosti $28\,809\ kg$ *sestavené z klece a* 20 *kusů závaží.* 31

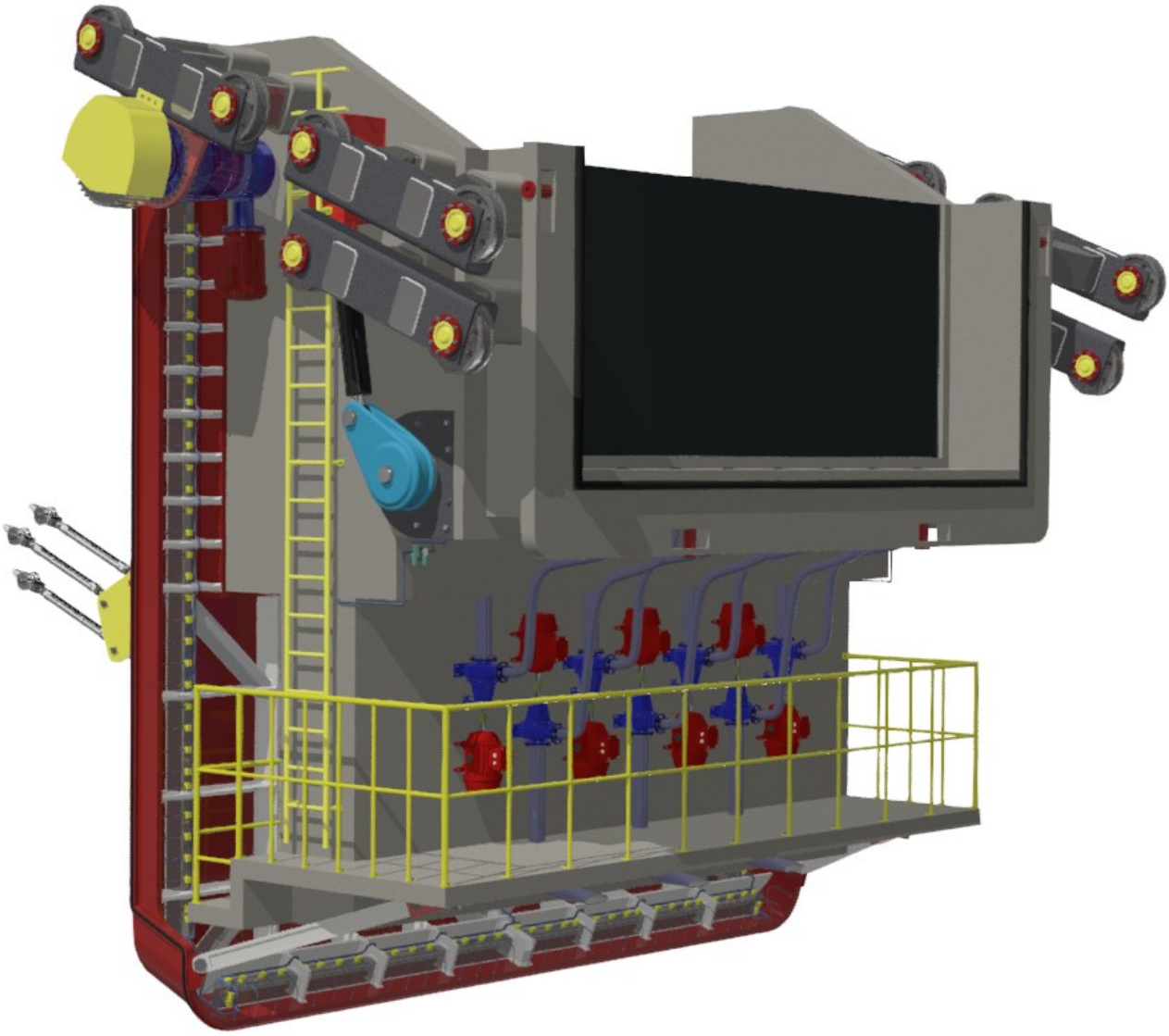
Klec protizávaží s pojezdy. 32

Těsnicí štít s přiraženou pohyblivou lodní vanou s vodou. 33

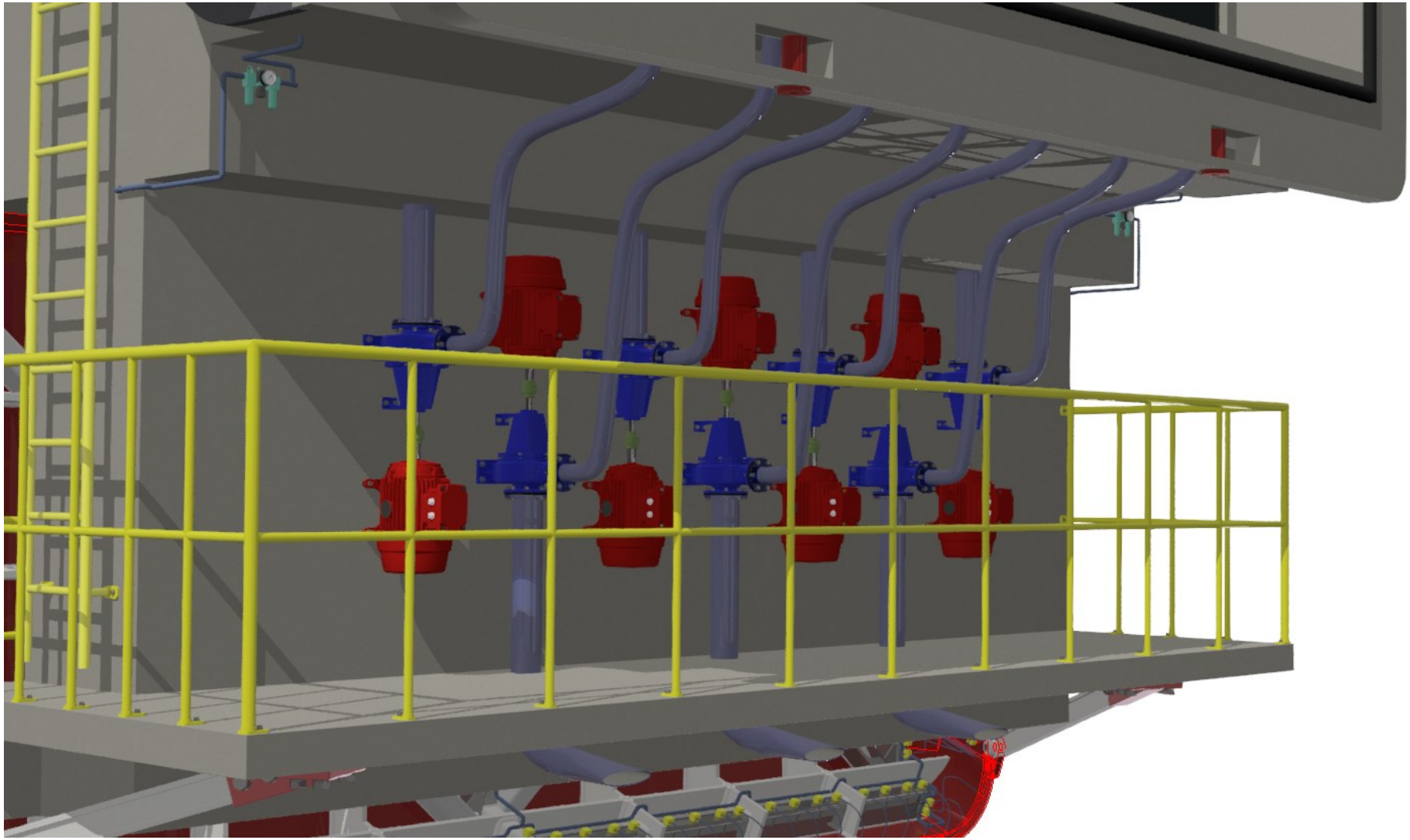
Těsnicí štít s přiraženou pohyblivou lodní vanou s vodou. 34



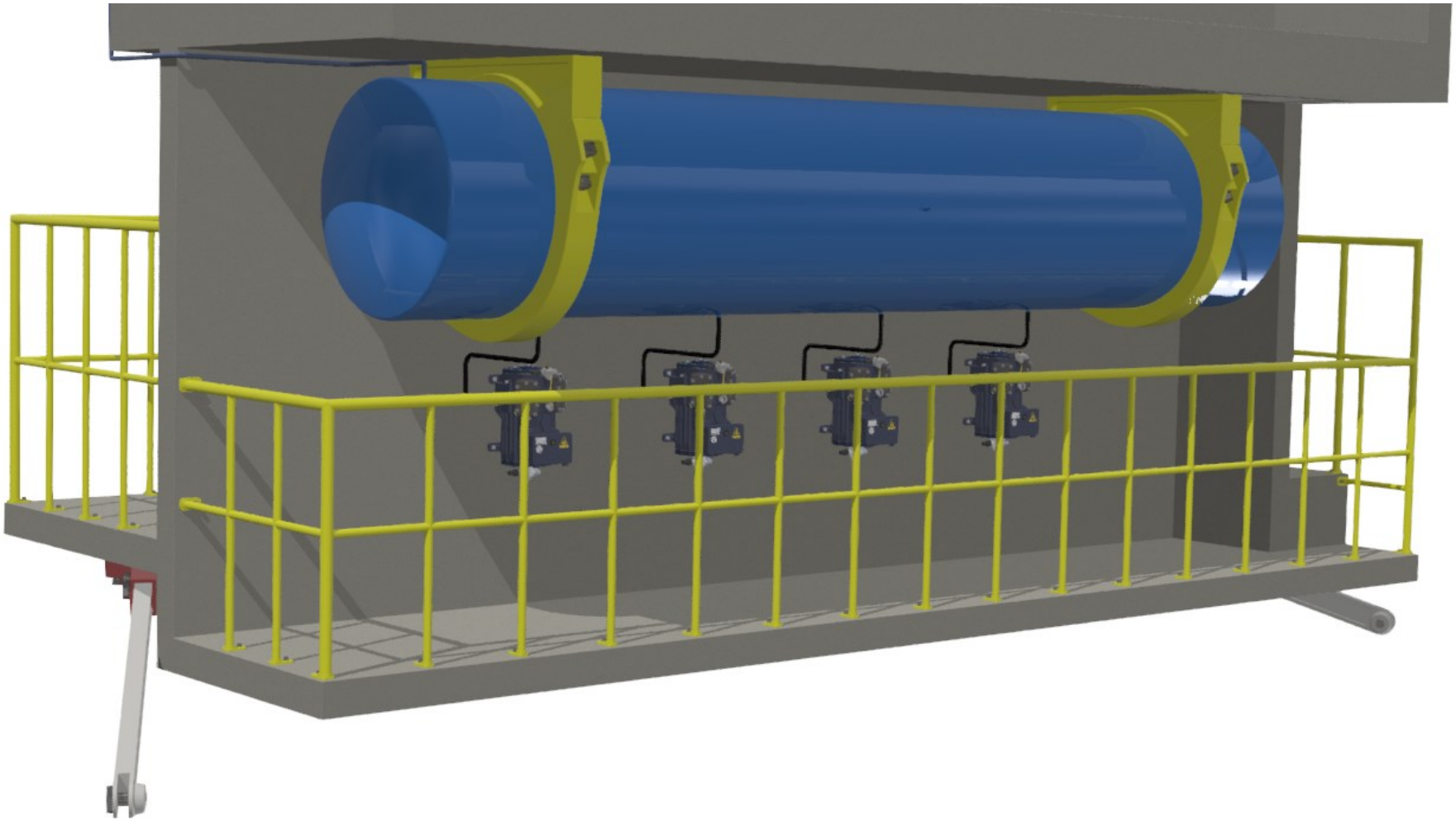
Celková sestava konstrukce těsnicího štítu.



Celková sestava konstrukce těsnicího štítu.

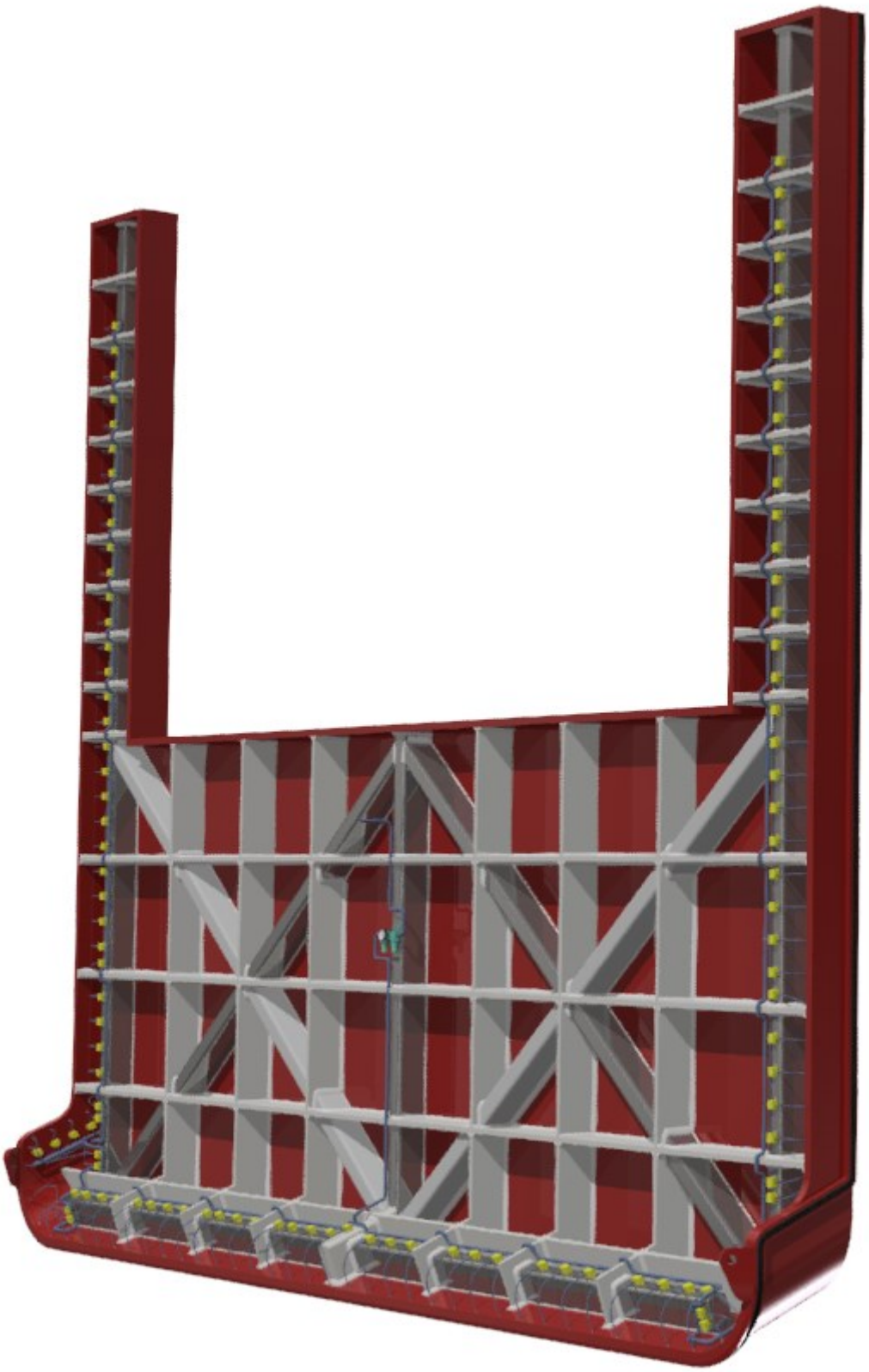


Čerpadla s potrubím pro napouštění a vypouštění vyrovnávací komory.

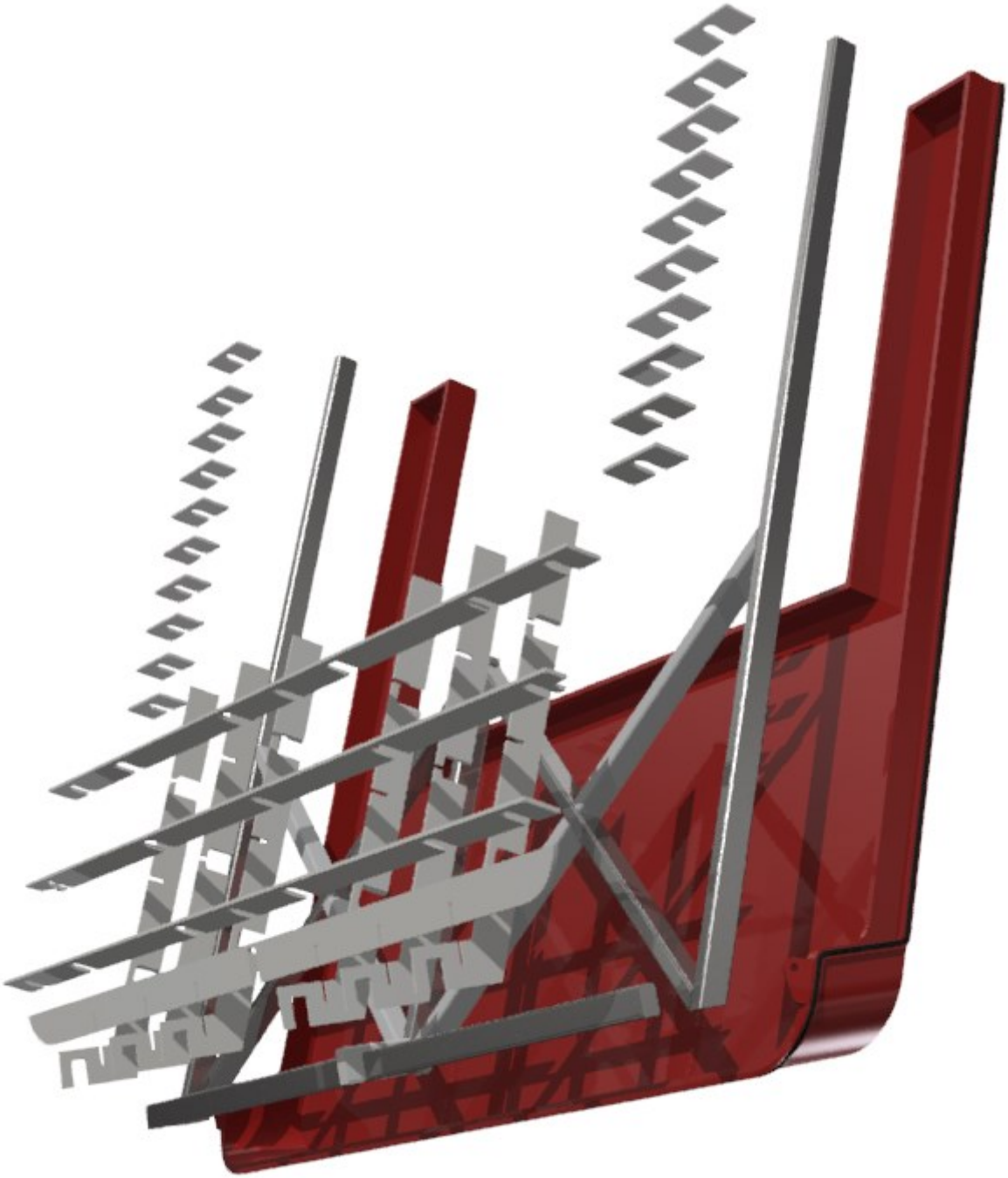


Vzduchový zásobník s kompresory.

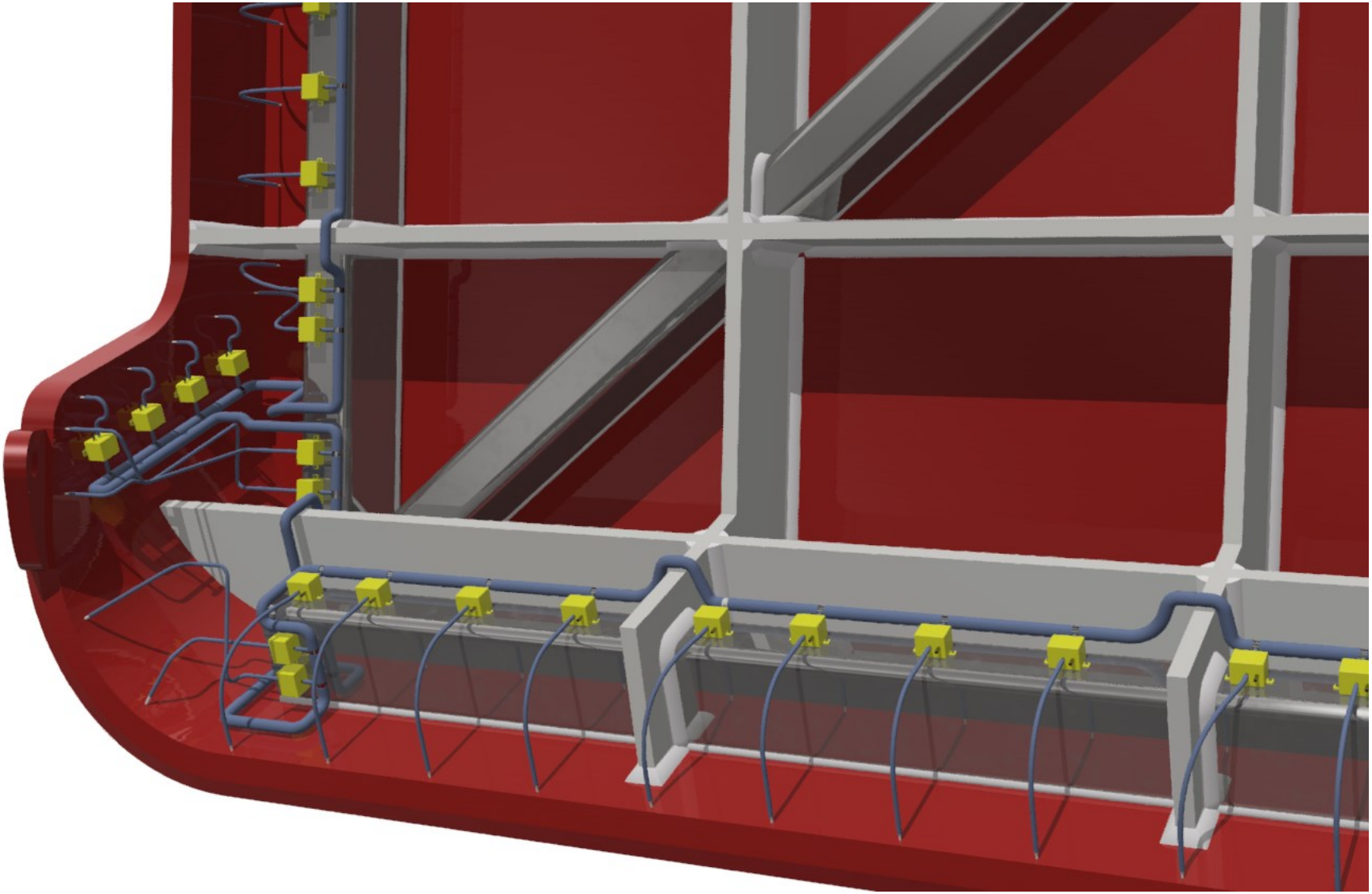
Kostra těsnicího štítu bez oplátování.



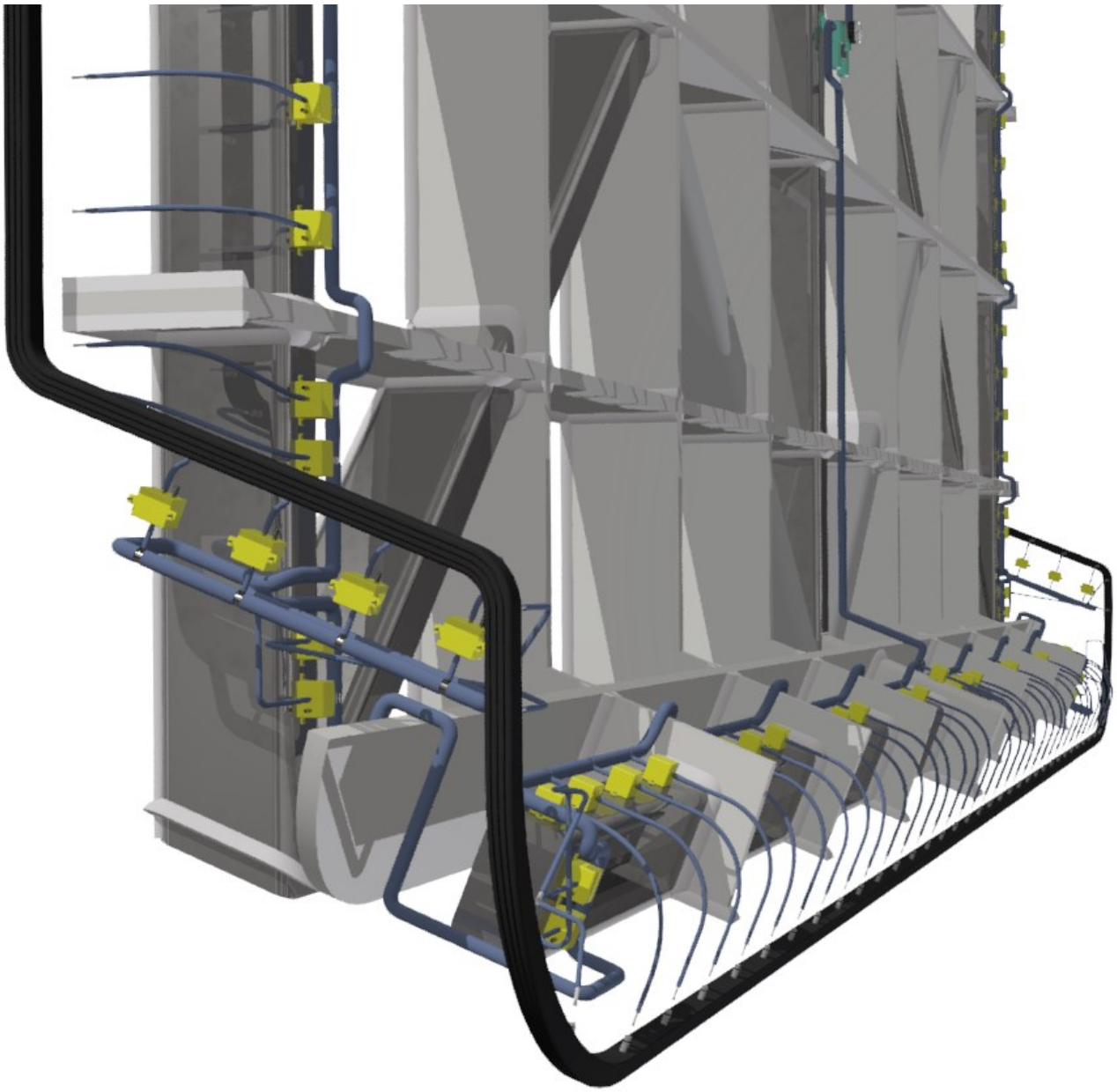
Konstrukce těsnicího štítu s rozvodem vzduchu do nafukovacího těsnění.



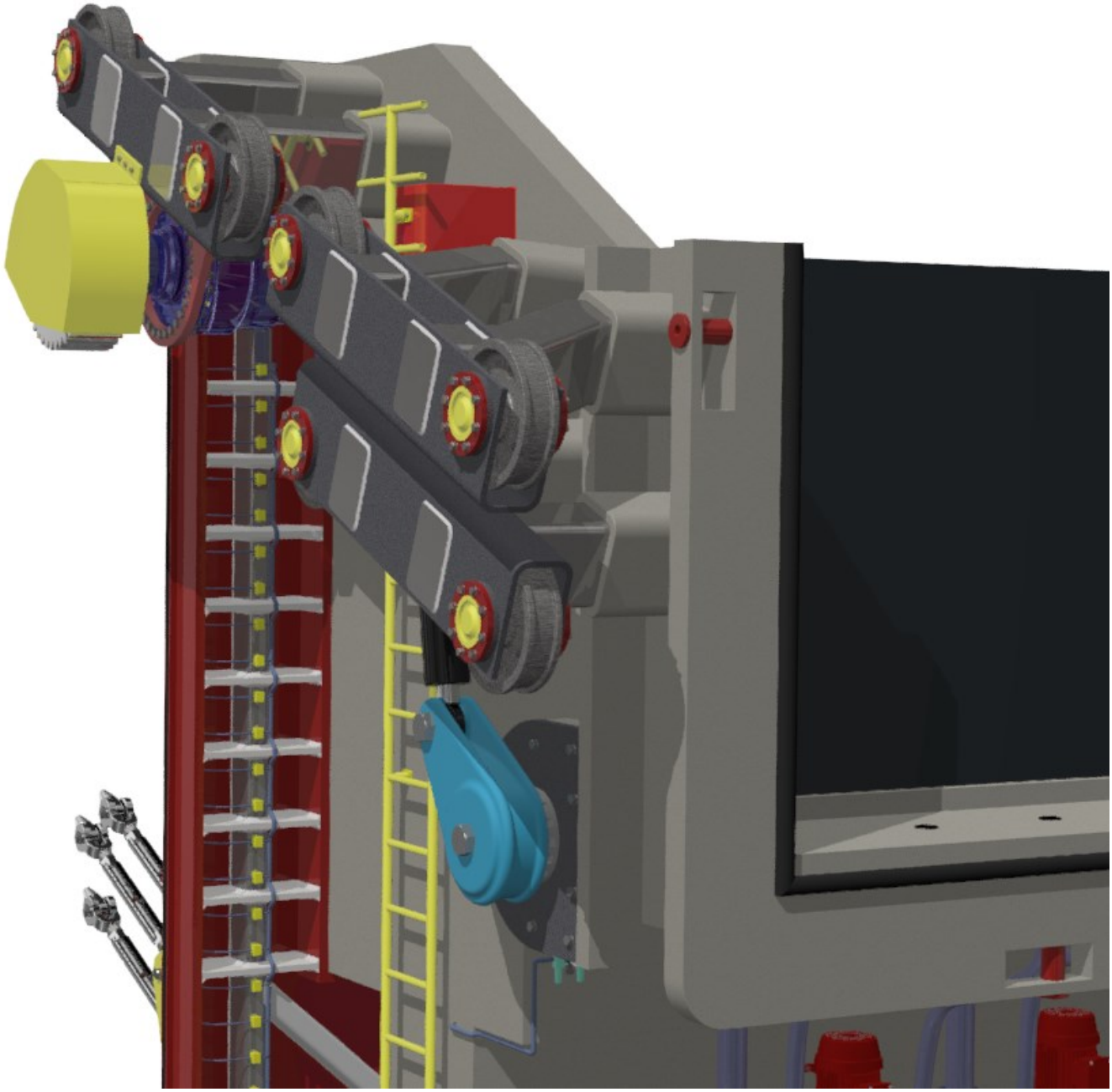
Rozklad konstrukce těsnicího štítu.



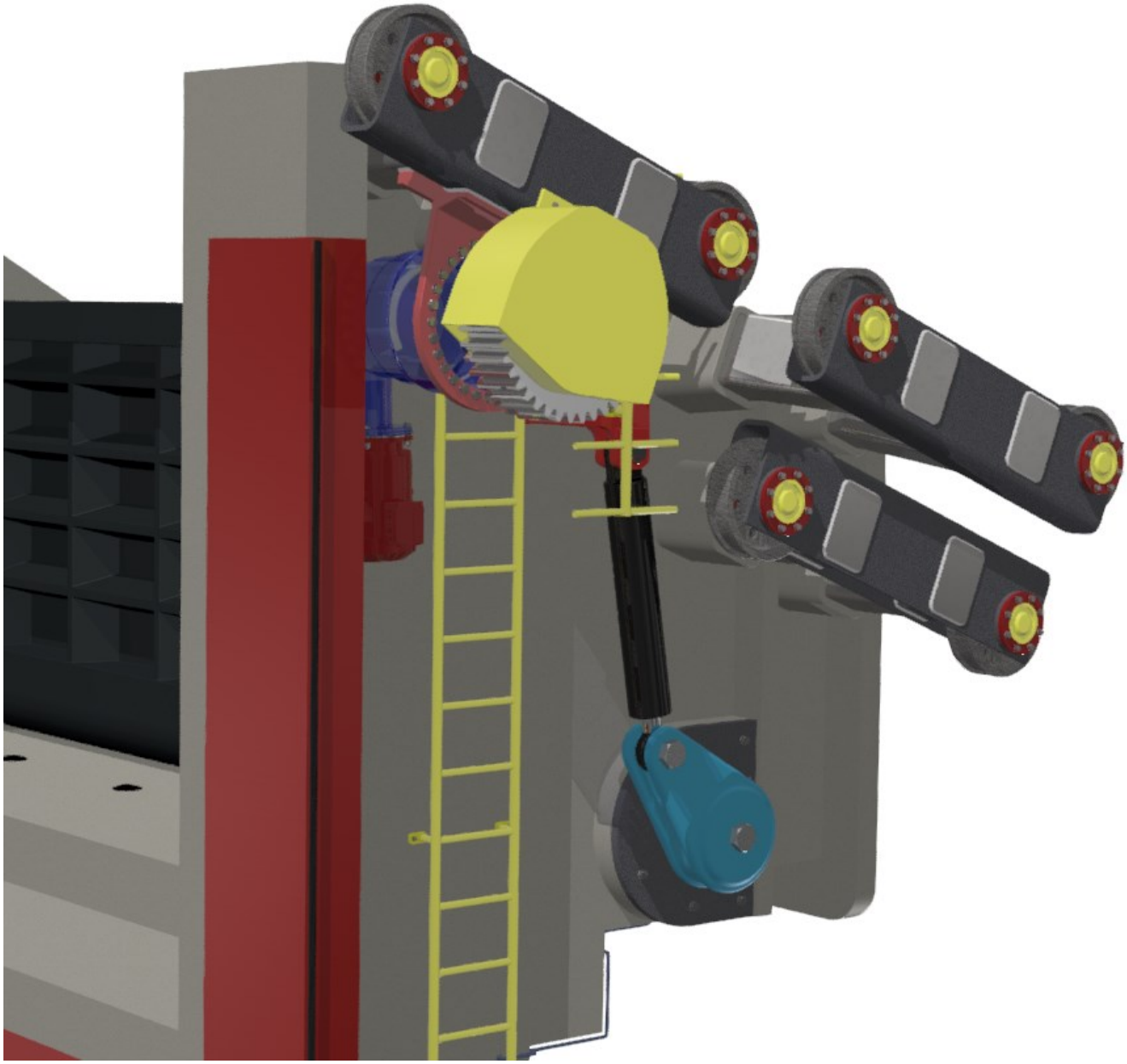
Rozvody vzduchu do jednotlivých komor nafukovacího těsnění opatřené zpětnými ventily.



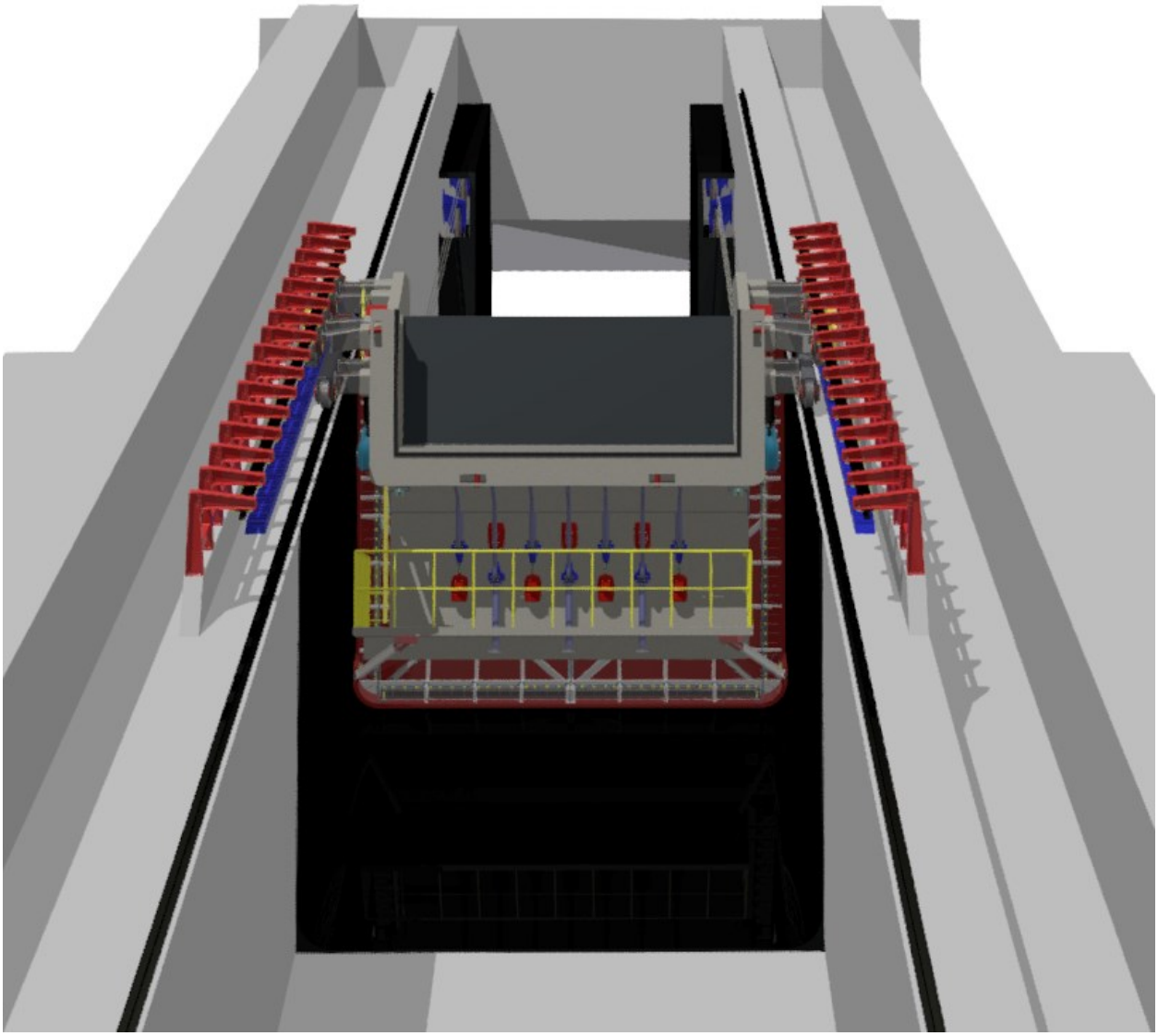
Rozvody vzduchu do jednotlivých komor nafukovacího těsnění přes kanály v těle těsnicího štítu.



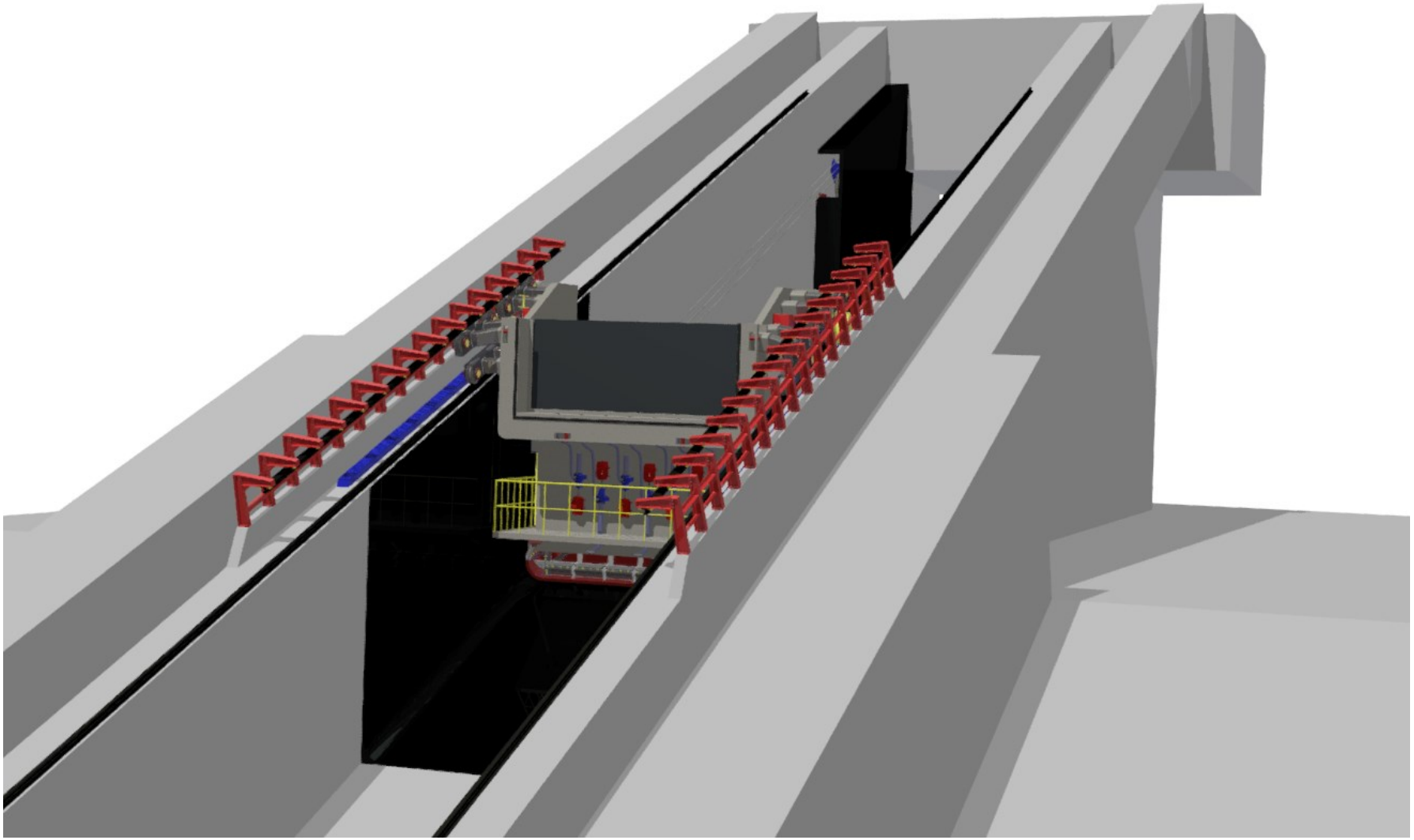
Pojezdové ústrojí celkové sestavy těsnicího štítu.



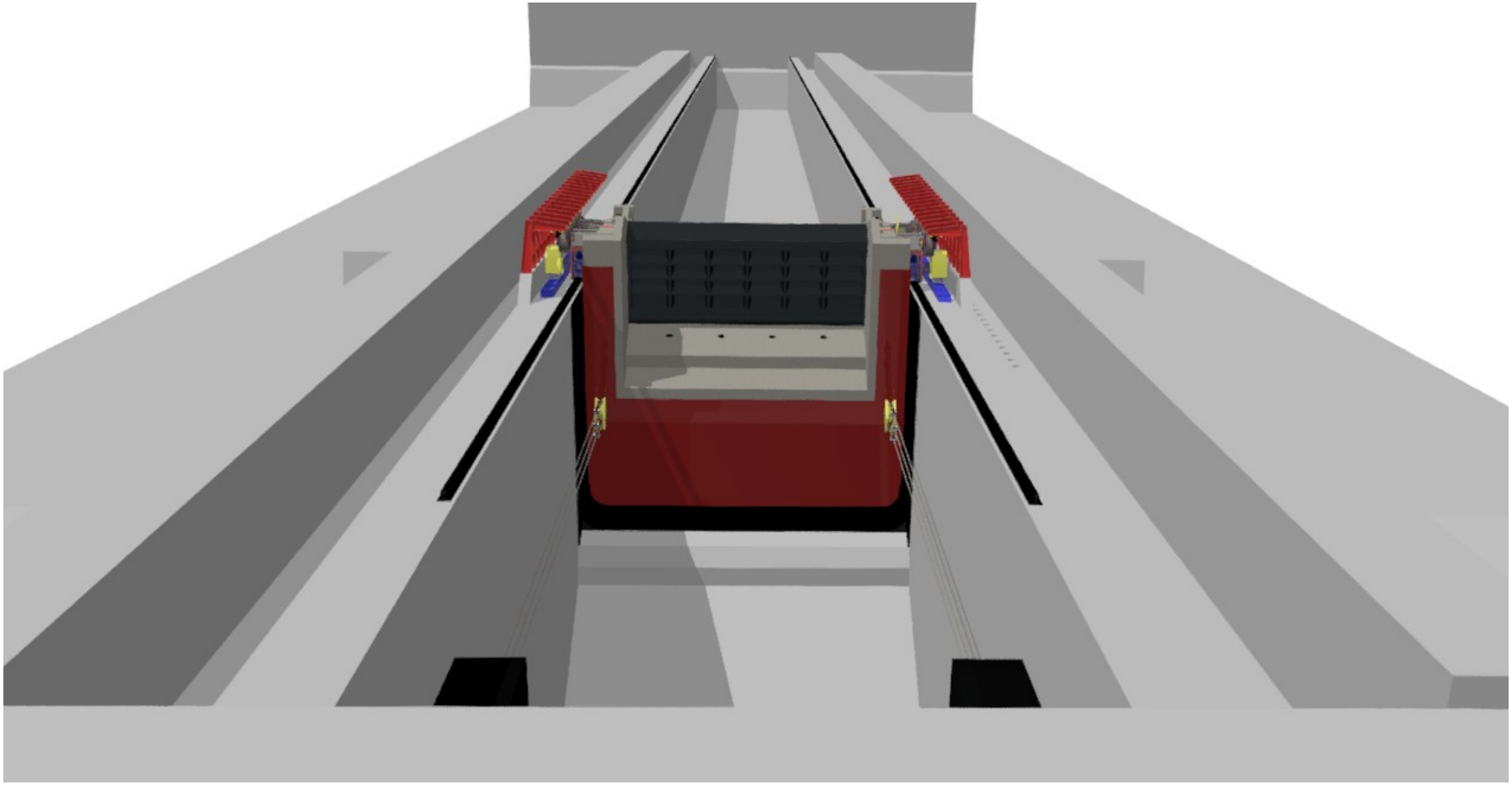
Pojezdové ústrojí celkové sestavy těsnicího štítu.



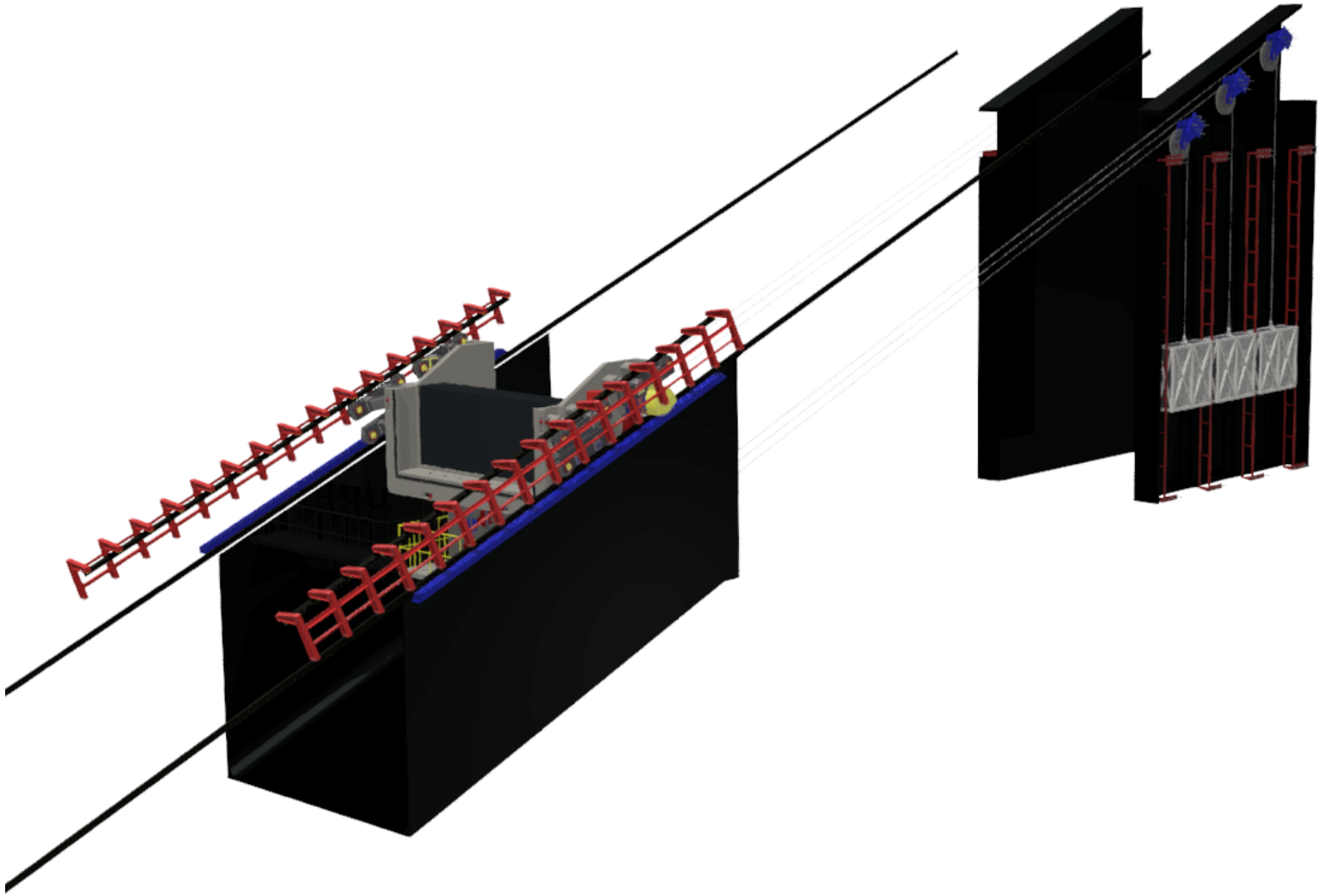
Dráha lodního zdvihadla osazená kompletně navrženým těsnicím štítem.



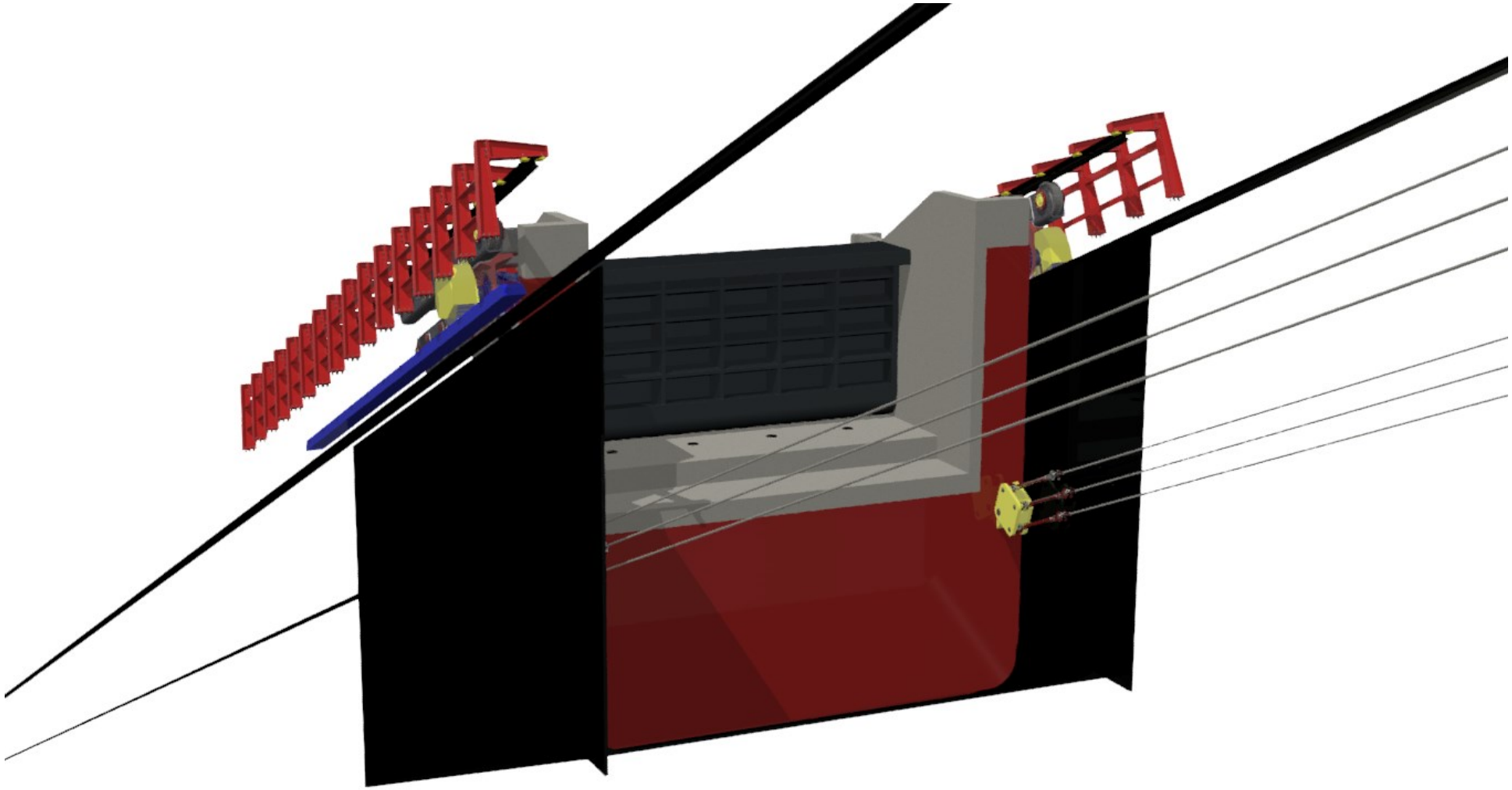
Dráha lodního zdvihadla osazená kompletně navrženým těsnicím štítem.



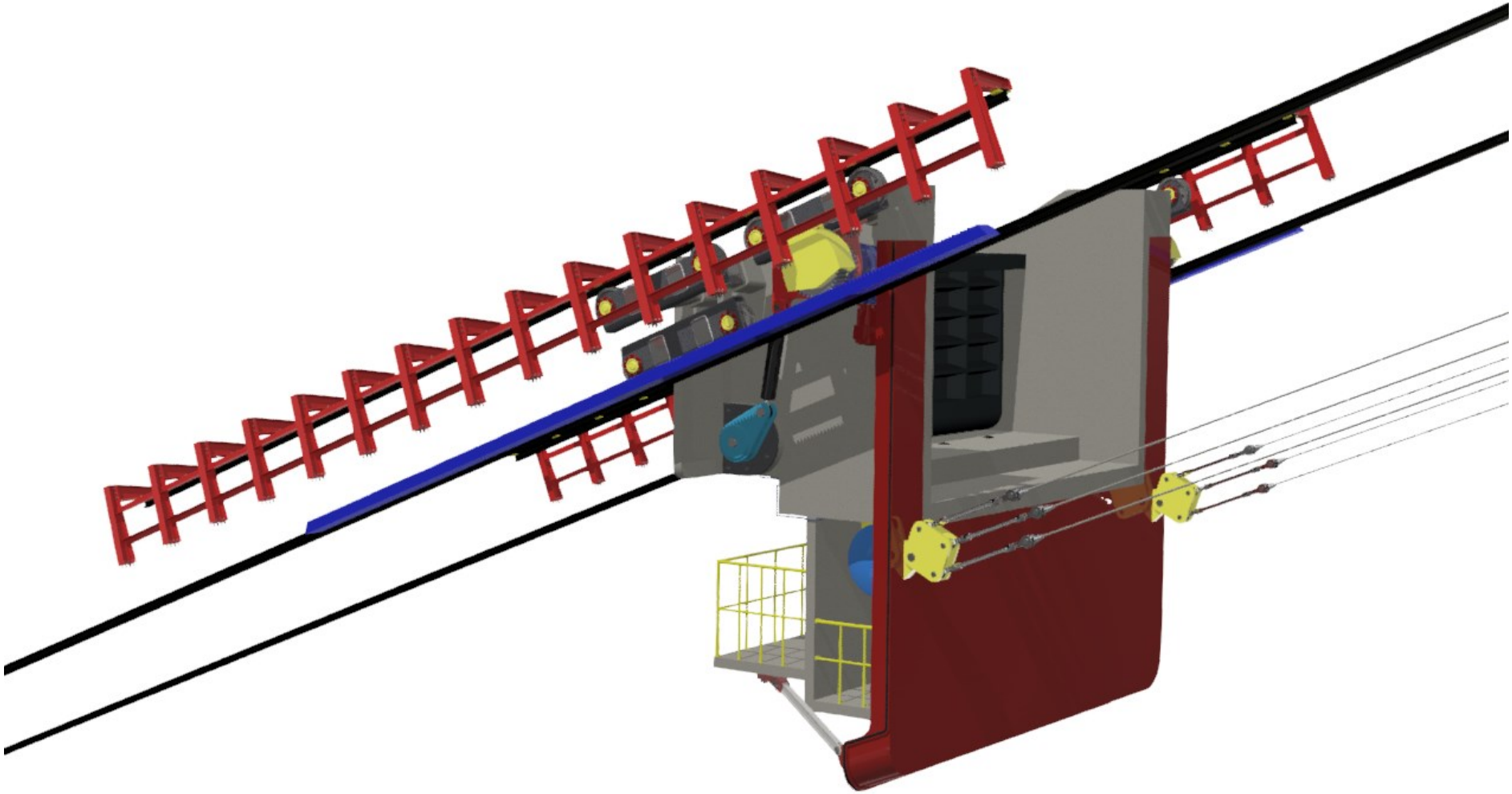
Dráha lodního zdvihadla osazená kompletně navrženým těsnicím štítem.



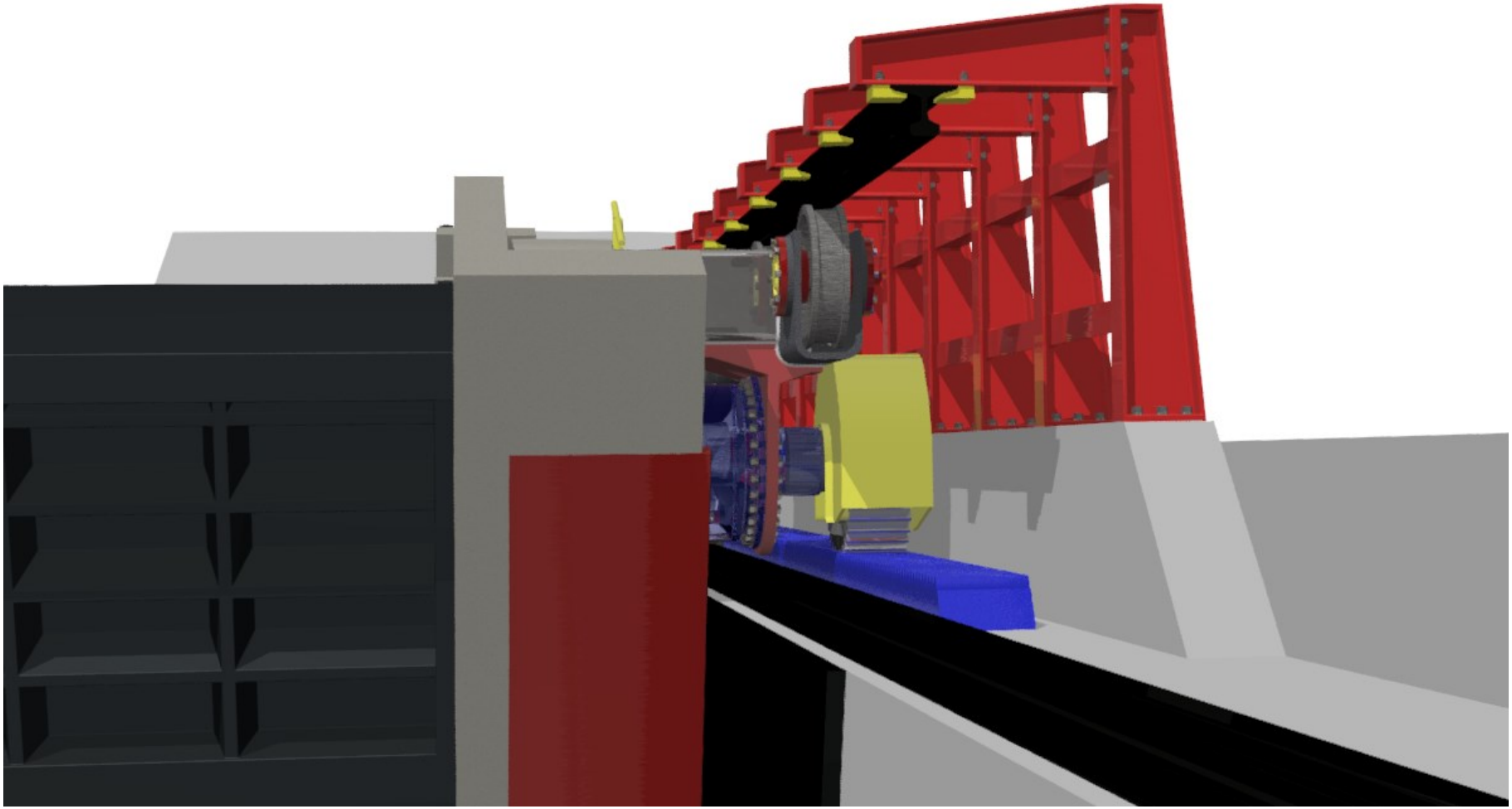
Funkční celek navržený v bakalářské práci k utěsnění dráhy lodního zdvihadla



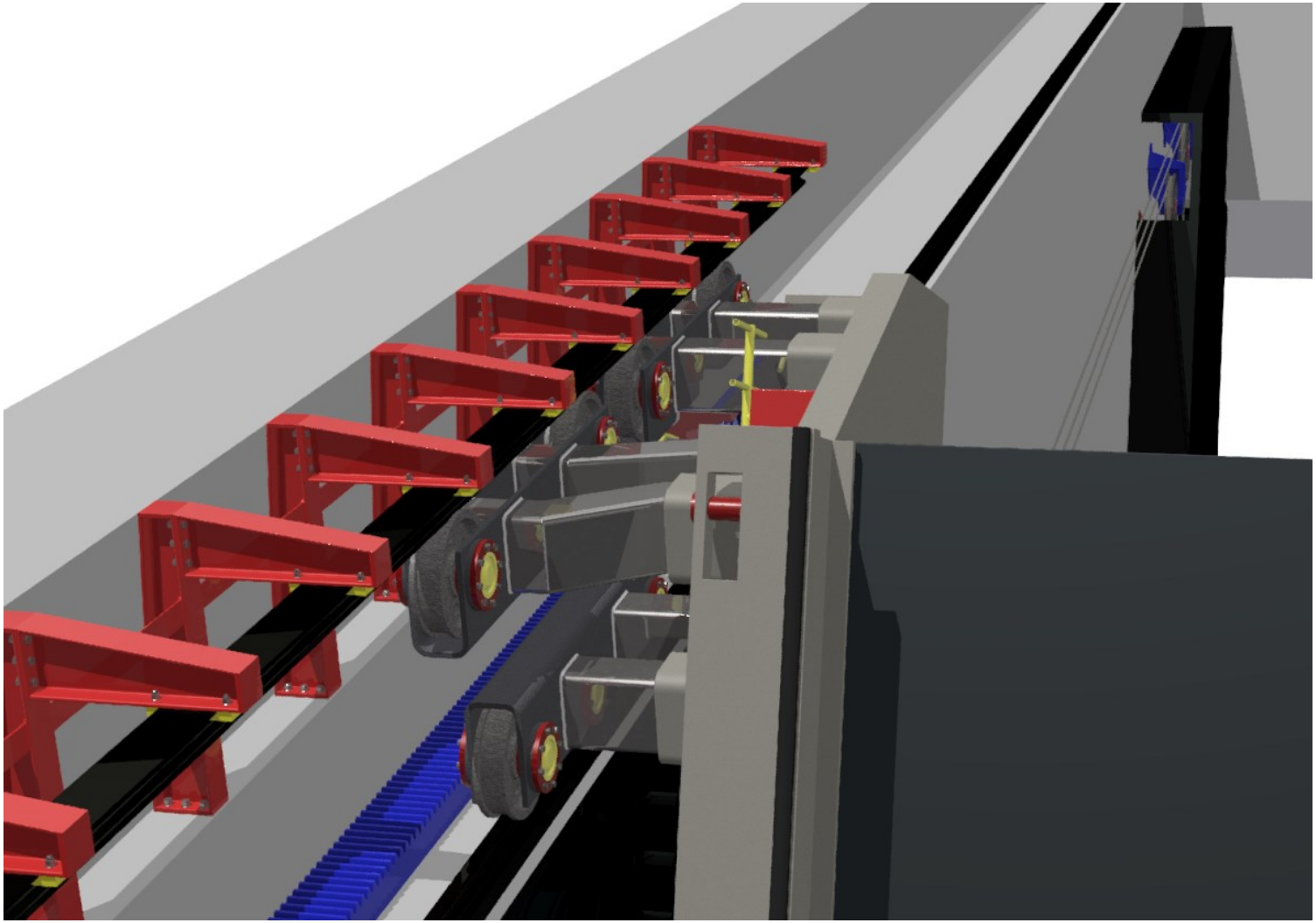
Oplátování pracovní dráhy těsnicího štítu.



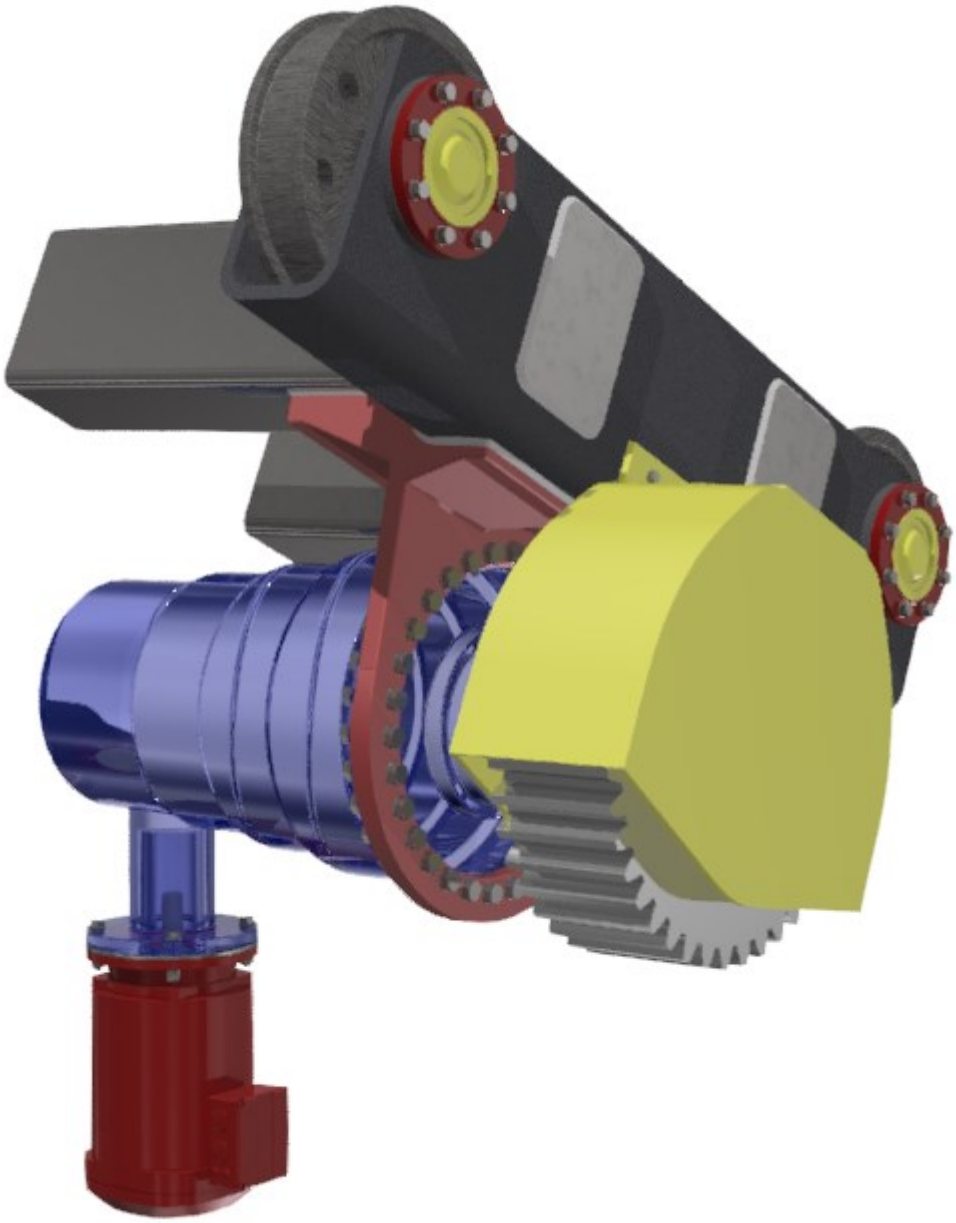
Konstrukční návrh pojezdového ústrojí k zajištění pohybu a zabránění překlápění sestavy šikmého těsnicího štítu.



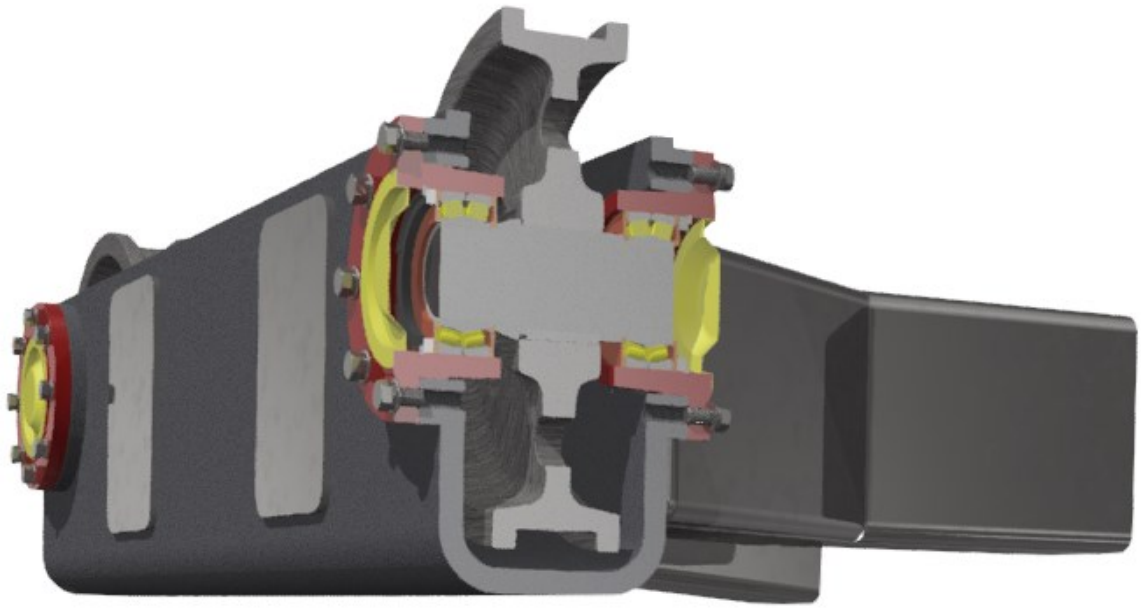
Záběr ozubeného kola s ozubeným hřebenem a konstrukční návrh zajištění sestavy těsnicího štítu proti překlápění horním pojezdem s kolejnicí.

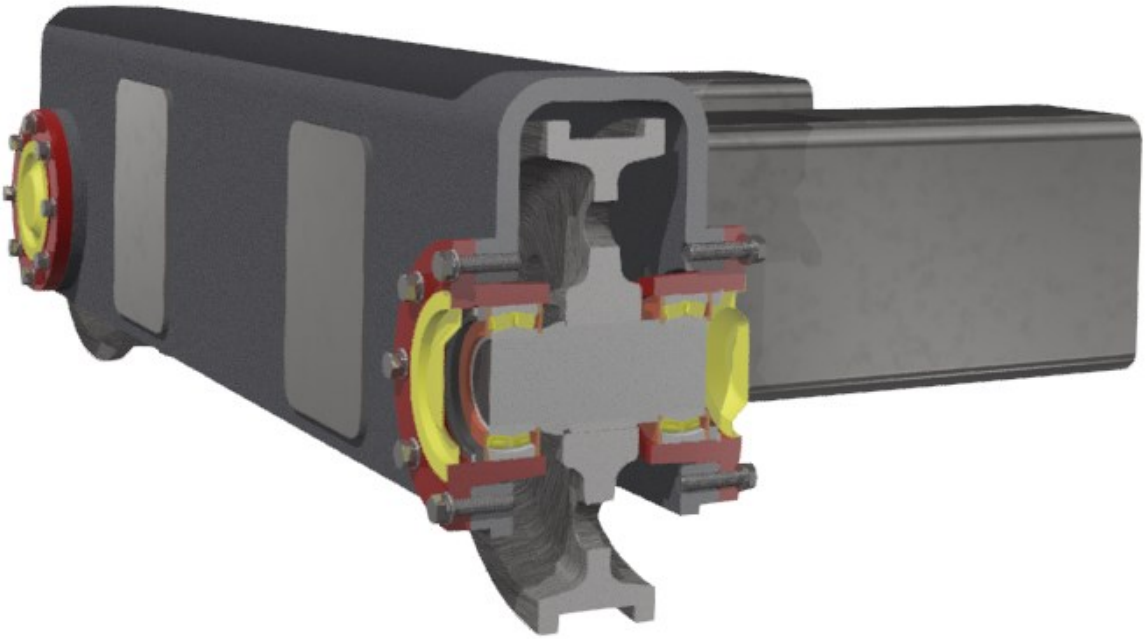


Pojezdové ústrojí.

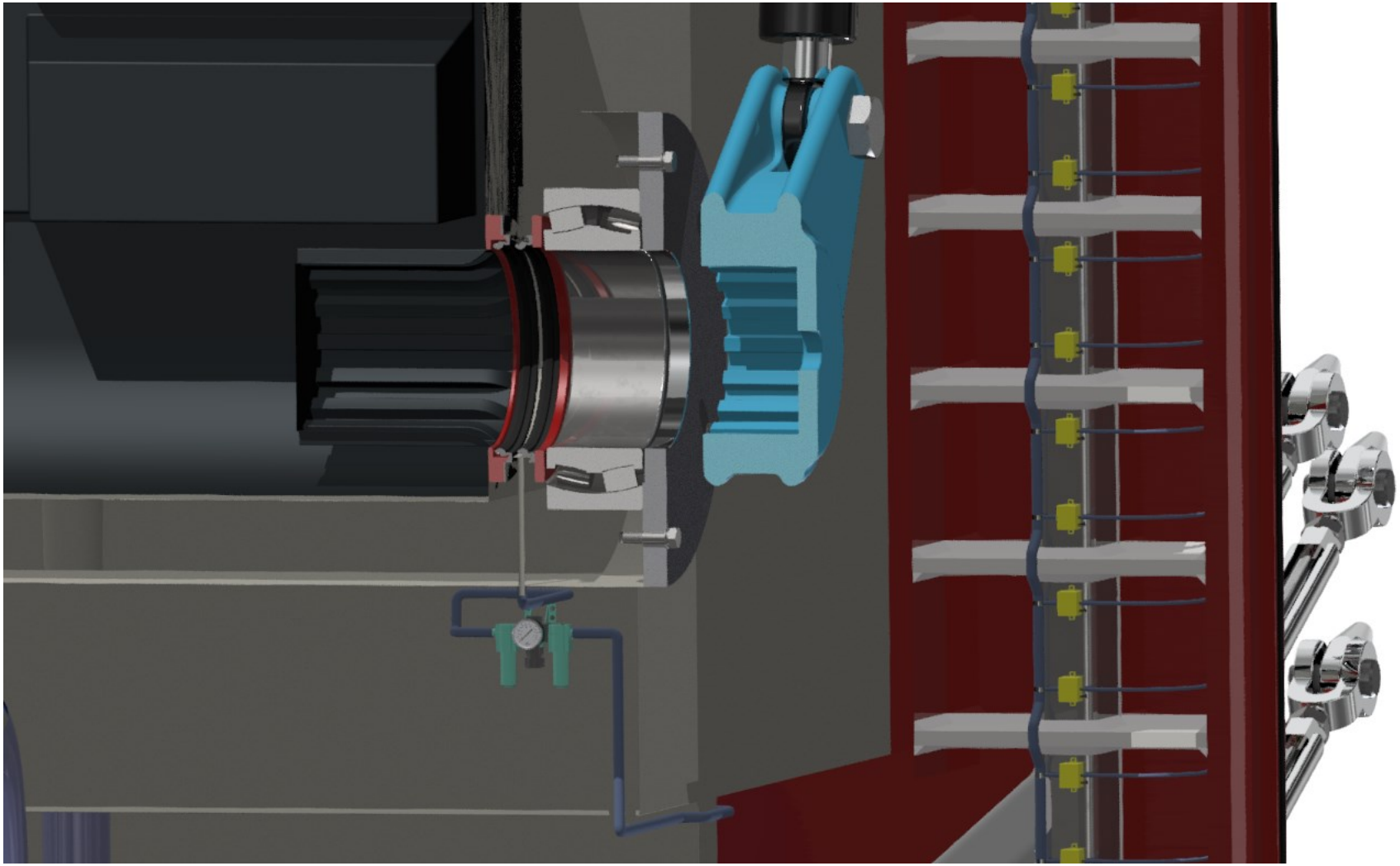


Hnací jednotka připevněná na nosník pojezdů.

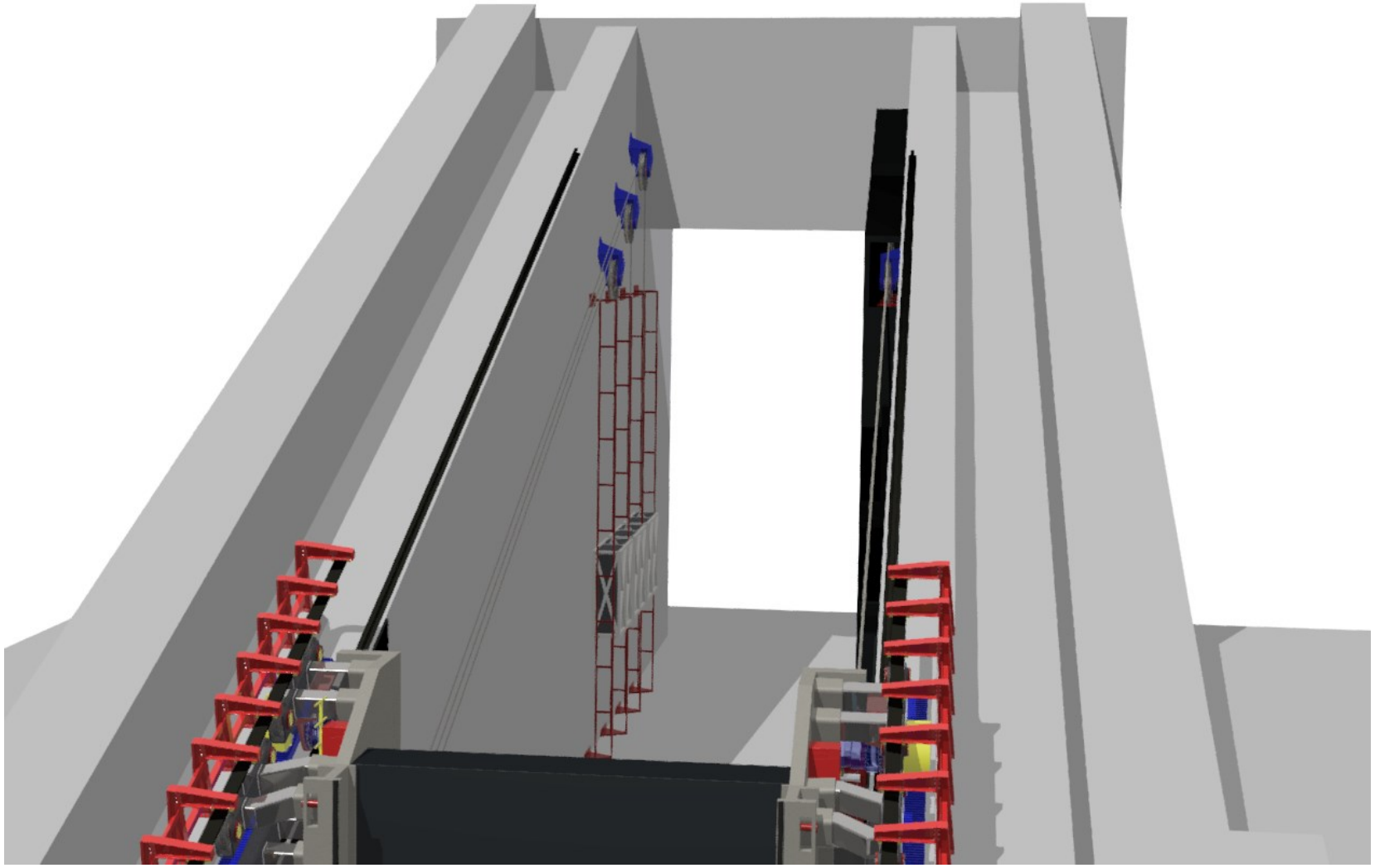




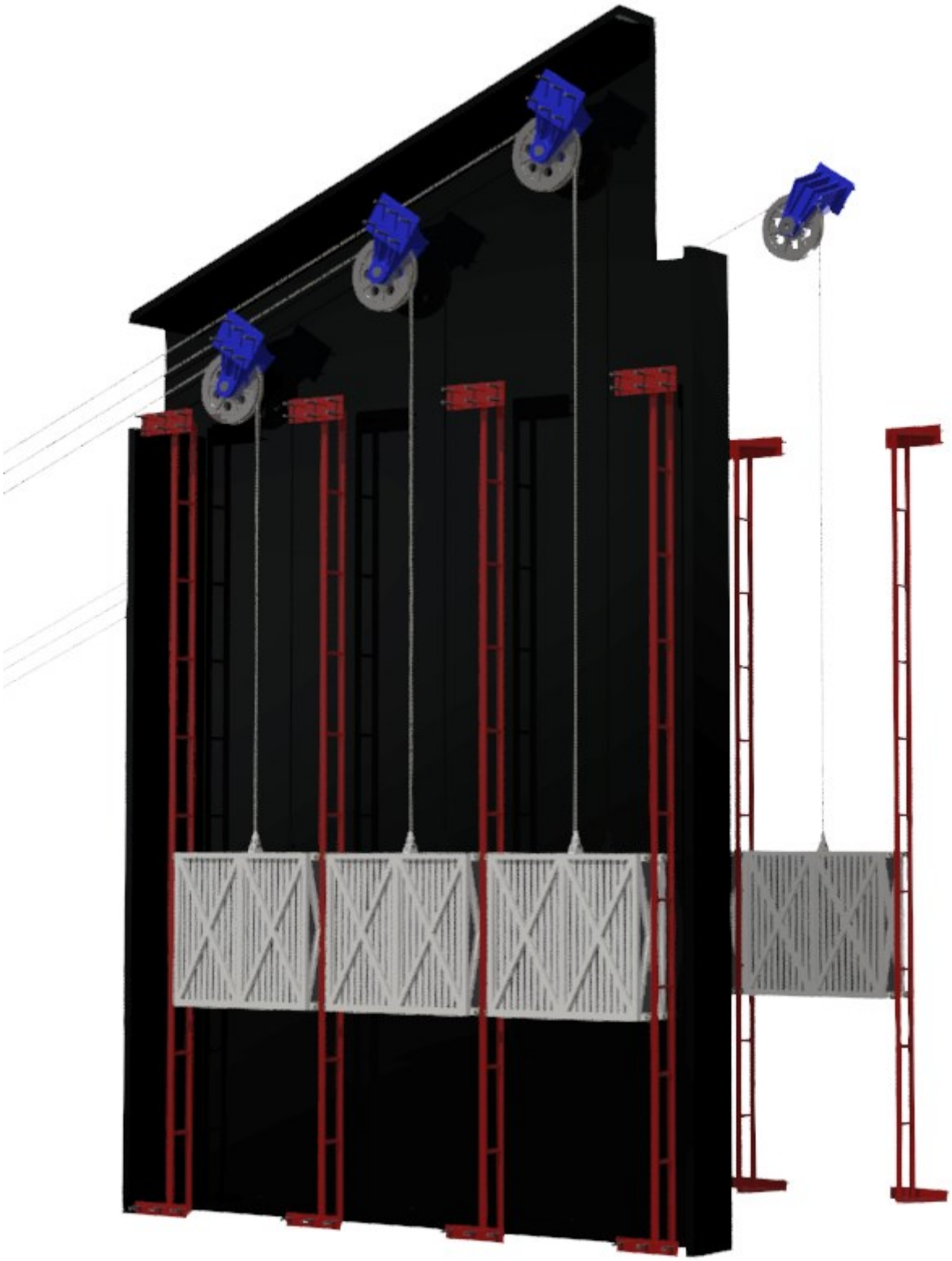
Sestava pojezdu těsnicího štítu s řezem jeřábovými pojezdy.



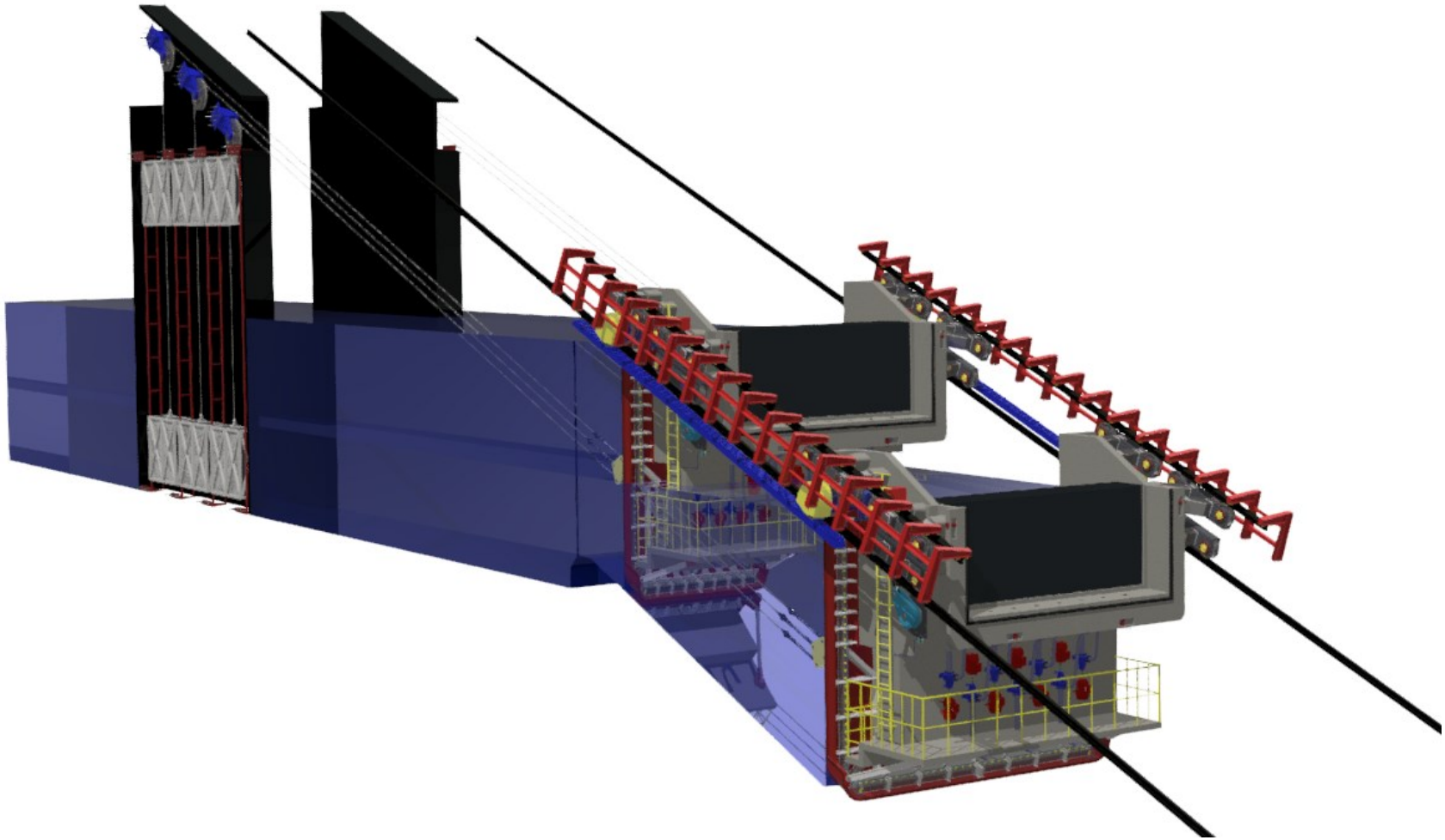
Konstrukční návrh uložení hřídelů vrat a jejich utěsnění.



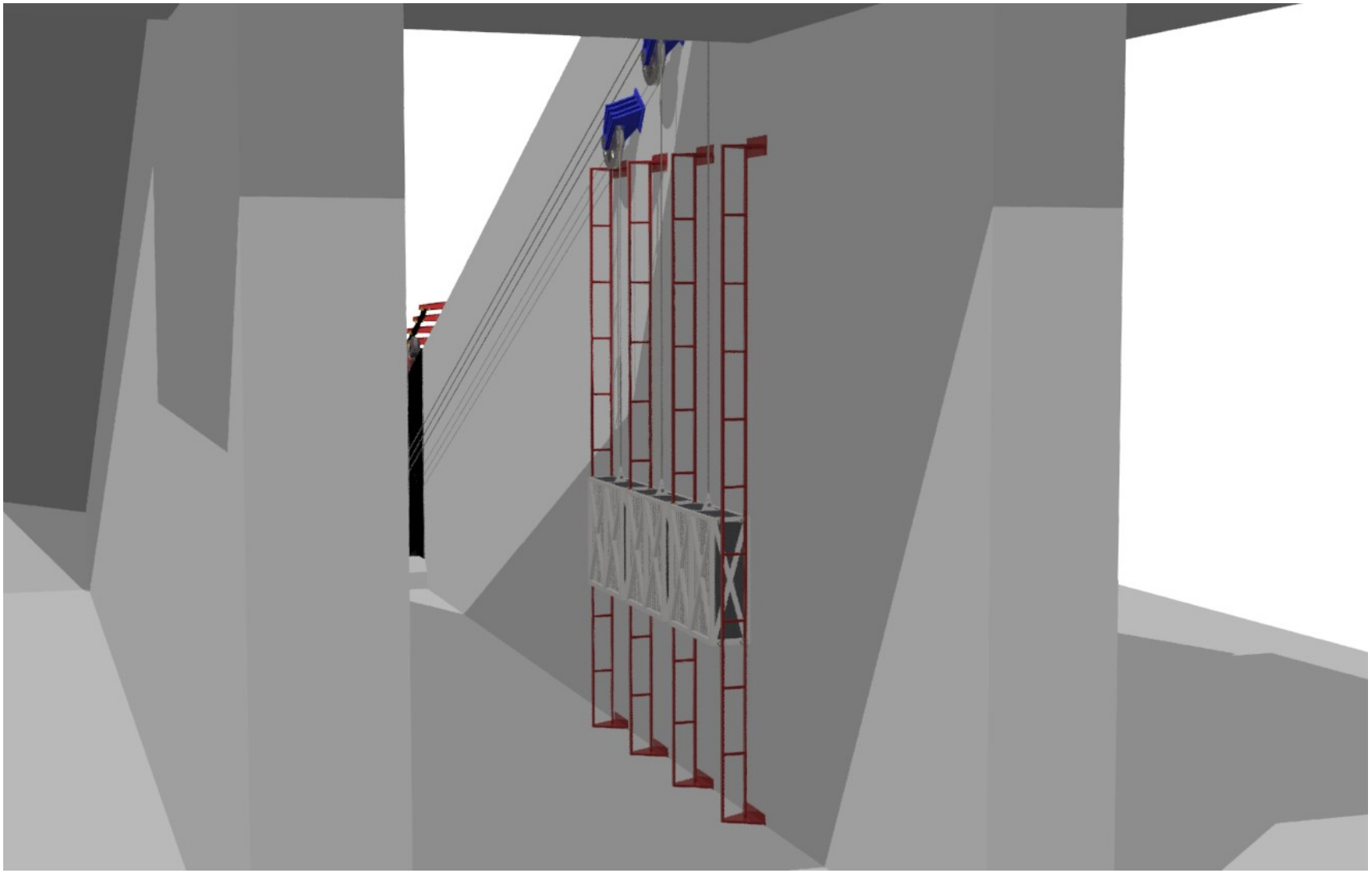
Vyvážení těsnicího štítu.



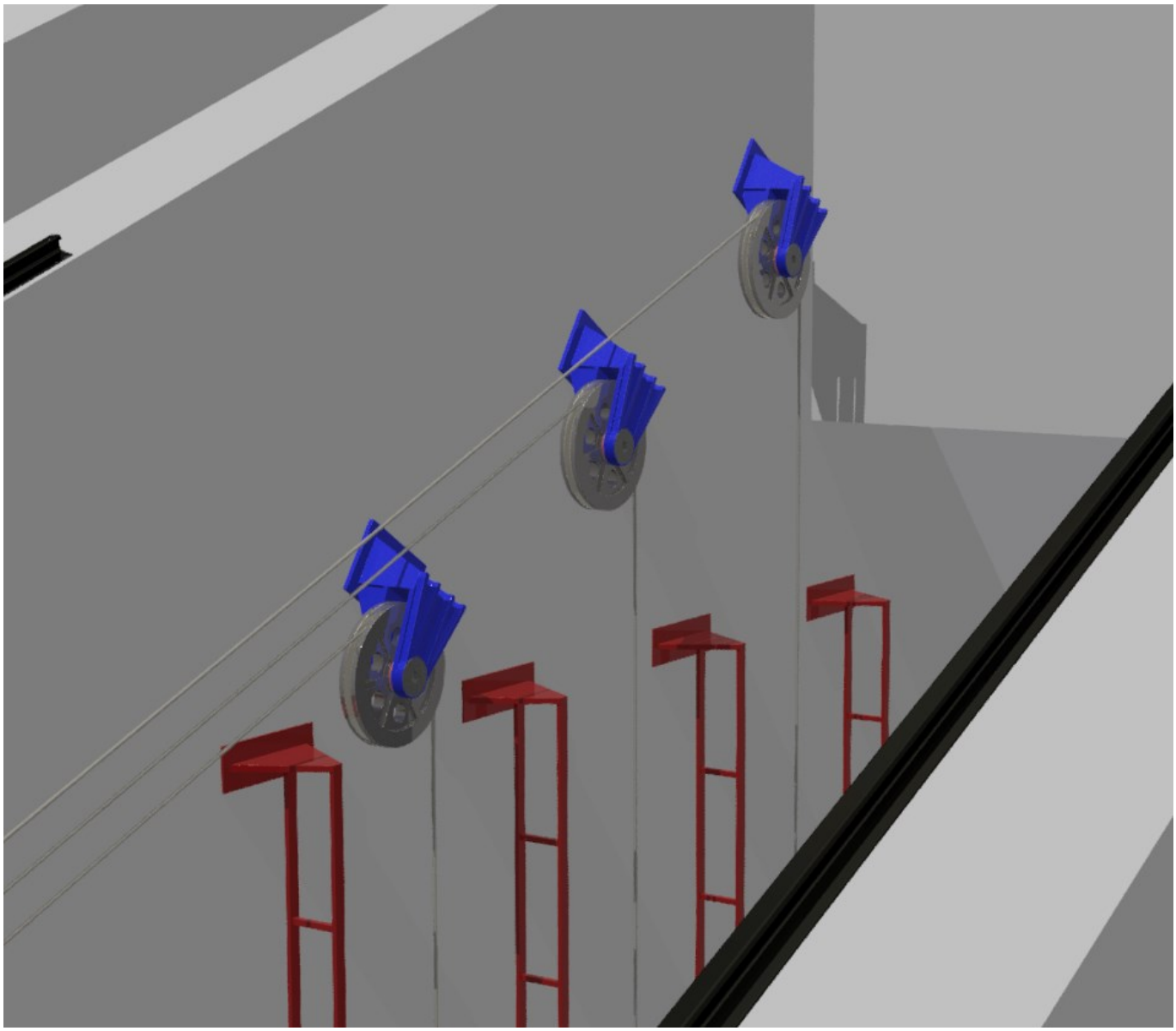
Návrh celkové sestavy vyvážení těsnicího štítu.



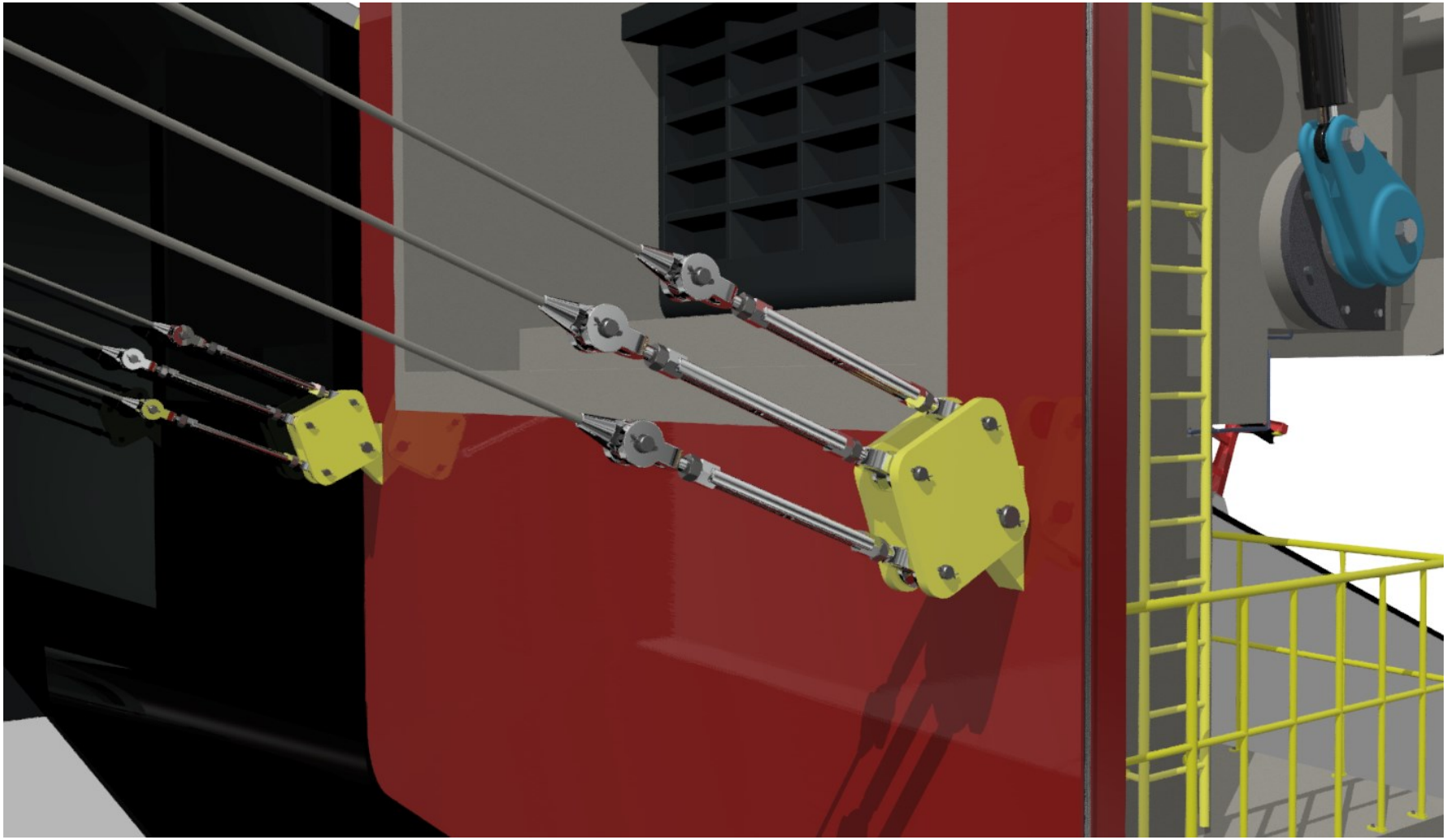
Oplátování protizávaží k zamezení působení vztlakové síly v určitých pracovních polohách šikmého těsnicího štítu.



Vodící konstrukce protizávaží.



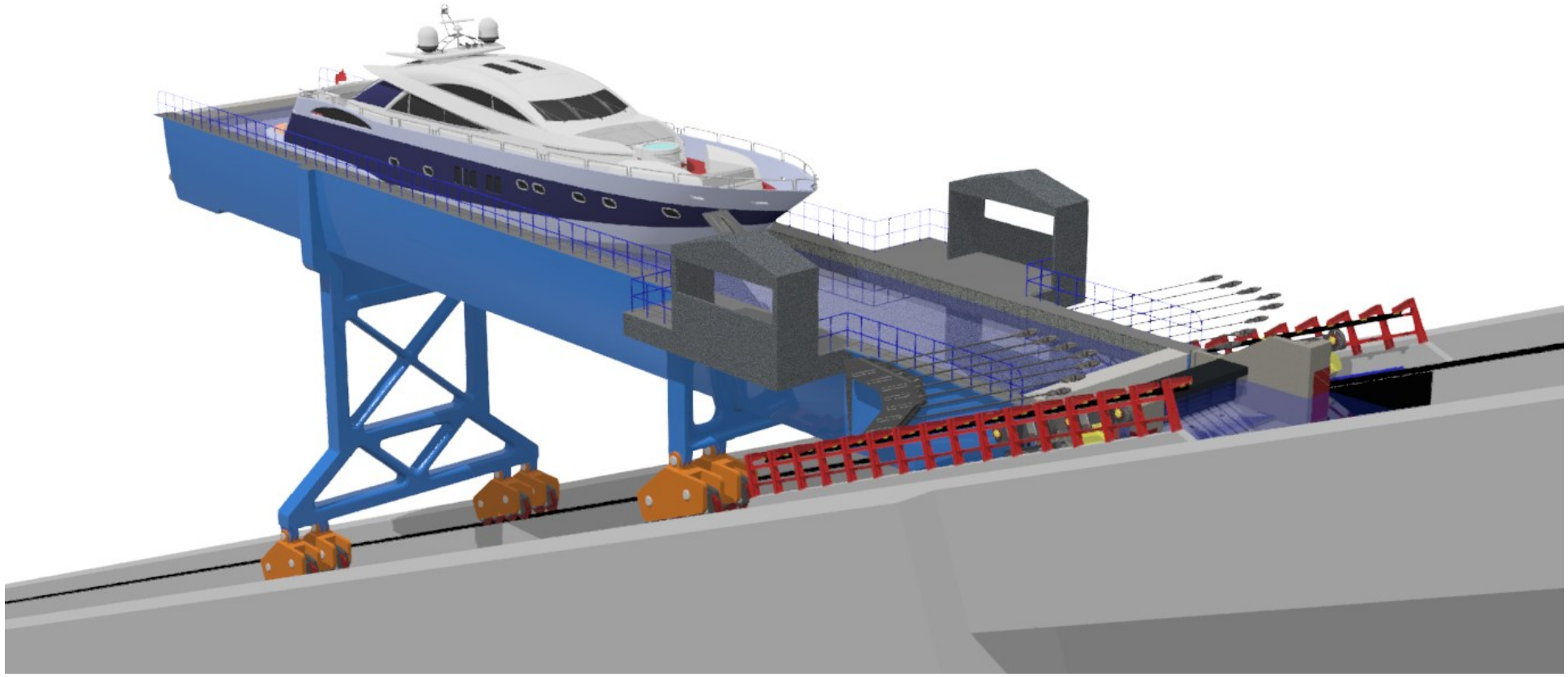
Uchycení kladek pro ocelová lana protizávaží do dráhy lodního zdvihadla.



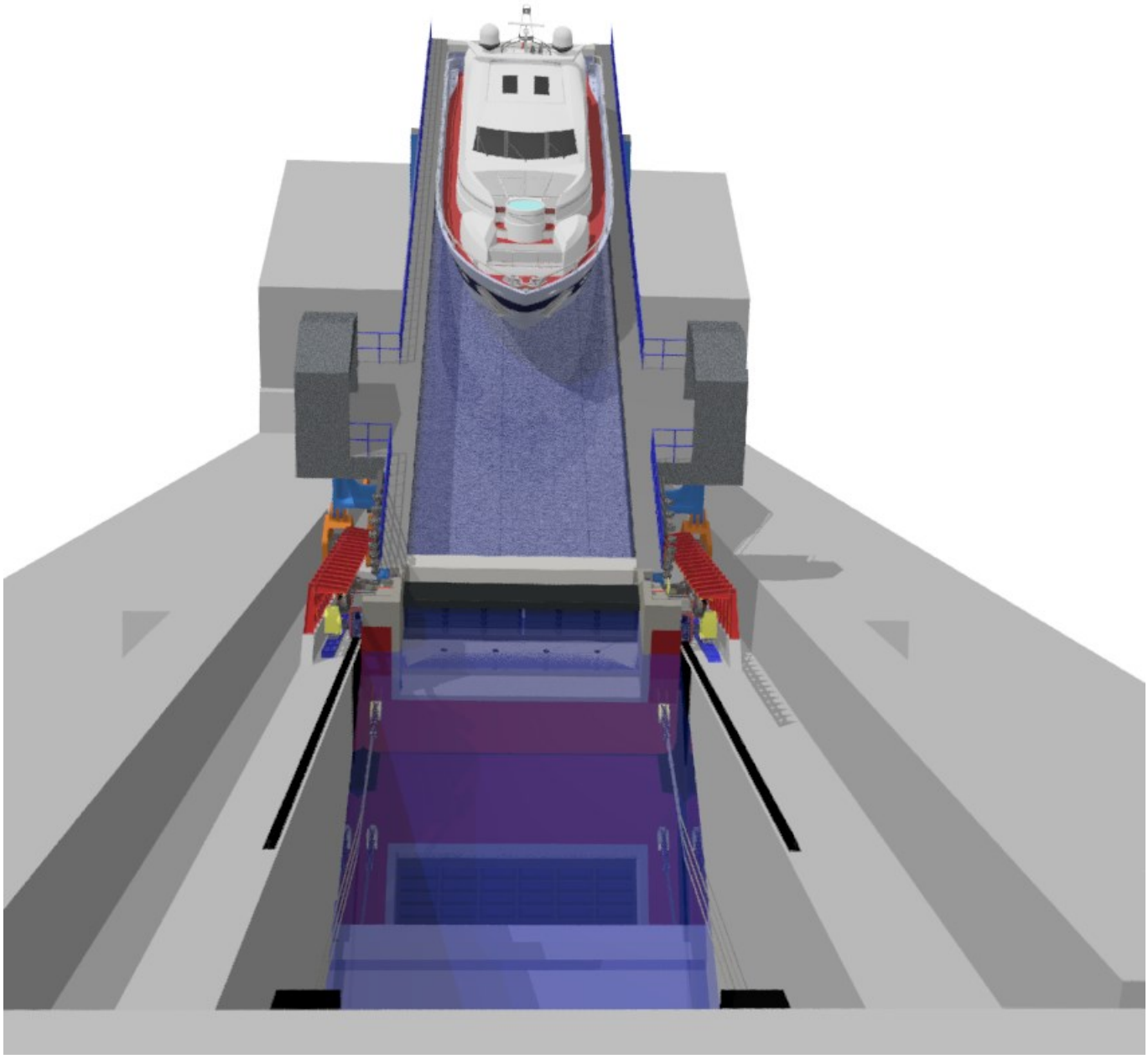
Uchycení ocelových lan každého z protizávaží ke štítu pomocí lanových napínáků.

Protizávaží o hmotnosti $28\,809\ kg$ *sestavené z klece a* 20 *kusů závaží.*

Klec protizávaží s pojezdy.



Těsnicí štít s přiraženou pohyblivou lodní vanou s vodou.



Těsnicí štít s přiraženou pohyblivou lodní vanou s vodou.