



Bakalářská práce

Zdymadlo Miřejovice – analýza spolehlivosti zvedání mostu

Studijní program:

B0613A140005 Informační technologie

Studijní obor:

Informatika a logistika

Autor práce:

David Jelínek

Vedoucí práce:

Ing. Jan Kamenický, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant práce:

Ing. Tomáš Berit

Povodí Vltavy, s.p.

Liberec 2025



Zadání bakalářské práce

Zdymadlo Miřejovice – analýza spolehlivosti zvedání mostu

Jméno a příjmení:

David Jelínek

Osobní číslo:

M22000155

Studijní program:

B0613A140005 Informační technologie

Specializace:

Informatika a logistika

Zadávací katedra:

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Akademický rok:

2024/2025

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií, aspekty provozování a funkcemi plavební komory.
2. Stanovte požadavky na spolehlivostní a bezpečnostní ukazatele technologických a řídicích systémů mostu.
3. Stanovte mezní hodnoty pravděpodobnosti nastoupení nebezpečné poruchy/selhání zvedání mostu.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	dle potřeby dokumentace
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	30 až 40 stran
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] TNI 010350 Management rizik – Slovník (Pokyn 73).
- [2] ČSN ISO 31000 (01 0351) Management rizik – Směrnice.
- [3] VALIŠ, David, Alena BREZNICKÁ a Jiří STODOLA. Management rizik: vysokoškolská skripta. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2021. ISBN 978-80-7582-349-6.

<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Jan Kamenický, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky
-----------------------	---

<i>Konzultant práce:</i>	Ing. Tomáš Berit Povodí Vltavy, s.p.
--------------------------	---

<i>Datum zadání práce:</i>	12. října 2024
<i>Předpokládaný termín odevzdání:</i>	9. května 2025

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Chaloupka, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Zdymadlo Miřejovice – analýza spolehlivosti zvedání mostu

Abstrakt

Jedním z vodních děl Povodí Vltavy s.p. je jez v Miřejovicích, který vzdouvá vodu pro dosažení potřebné plavební hloubky, pro vodní elektrárnu a pro odběry vody. Nad jezem vede historicky cenný most, který je potenciální překážkou pro plavbu větších lodí plavební komorou. Proto se zpracovává návrh zvedání části jezového mostu. Účelem práce je:

- seznámit se s provozováním plavební komory,
- stanovení požadavků na spolehlivost a bezpečnost technologických a řídicích systémů zdvihání mostu
- stanovit mezní hodnoty pravděpodobnosti nebezpečného selhání zvedání mostu.

Základní vstupní údaje k vodnímu dílu a technickým řešením zvedání mostu poskytne Povodí Vltavy, státní podnik, a to včetně seznámení s vodním dílem formou prohlídky.

Klíčová slova: Spolehlivostní analýza, Úroveň pohotovosti, FMECA, HAZOP, MTTR, Analýza poruch, Riziková analýza

Miřejovice Lock – Reliability Analysis of Bridge Lifting

Abstract

One of the hydraulic structures of the Vltava River Basin is the Miřejovice weir, which raises the water level to achieve the required navigational depth, support the hydroelectric power plant, and supply water. A historically valuable bridge spans the weir, potentially obstructing the passage of larger vessels through the navigation lock. Therefore, a proposal is being prepared for lifting a section of the weir bridge. The purpose of the work is to:

- familiarize oneself with the operation of the navigation lock,
- determine the reliability and safety requirements for the bridge-lifting technological and control systems,
- establish threshold values for the probability of hazardous failure of the bridge-lifting mechanism.

Basic information about the hydraulic structure and technical solutions for the bridge-lifting mechanism will be provided by the state enterprise Vltava River Basin, including a site inspection of the hydraulic structure.

Keywords: Reliability analysis, Operational availability, FMECA, HAZOP, MTTR, Failure mode analysis, Risk assessment

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ph.D. Janu Kamenickému za kvalitní odborné vedení, cenné rady a trpělivý přístup.

Rád bych také poděkoval Ing. Janu Střeštíkovi, který se i přes neformální roli konzultanta svými rychlými a ochotnými reakcemi významně podílel na vzniku této práce.

Jako poslední bych rád poděkoval všem zaměstnancům Oddělení spolehlivosti a rizik, kteří mě během mého bakalářského studia uvedli do problematiky spolehlivosti a rizik.

Obsah

Seznam zkratek	11
1 Úvod	12
2 Teoretický rámec	13
2.1 Terminologie využívaná ve spolehlivosti	13
2.2 Metody spolehlivostní a rizikové analýzy	14
2.2.1 Ukazatele MTBF a MTTR	14
2.2.2 Metody FMEA a FMECA	14
2.2.3 Blokový diagram bezporuchovosti	15
2.2.4 Analýza HAZOP	15
2.2.5 Metoda FTA	15
2.2.6 Metoda ETA	16
2.2.7 Matice rizik	16
3 Popis technického stavu mostu	17
3.1 Nosná konstrukce	17
3.2 Zvedací mechanismus	17
3.3 Plocha mostu	17
3.4 Zdroje elektrické energie	18
3.5 Řídící systém	18
3.6 Inženýrské sítě	18
3.7 Význam mostu pro regionální ekonomiku	18
4 Ekonomické zhodnocení projektu	19
4.1 Predikce ekonomického vývoje na dobu investice	19
4.1.1 Aktuální ekonomická situace	19
4.1.2 Odhad dopadu ekonomické situace na projekt	19
4.1.3 Index cen stavebních děl do roku 2024	20
4.1.4 Predikce vývoje diskontní sazby	20
5 Náklady související s projektem	21
5.1 Provoz objektu	21
5.1.1 Velké osobní kabinové lodě	21
5.1.2 Nákladní a jiné lodě	21
5.2 Náklady způsobené nefunkčností zvedacího mostu	22
5.2.1 Četnost znemožnění průplavu	22

5.2.2	Rozlišení typů závad	23
6	Analýza spolehlivosti a rizik pro zvedání mostu v Měřejovicích	24
6.1	Dekompozice systému	24
6.1.1	První úroveň dekompozice	24
6.2	Spolehlivostní analýza hydraulického systému	24
6.2.1	Blokový diagram hydraulického systému	25
6.2.2	Výpočet pohotovosti hydraulického systému	25
6.3	Spolehlivostní analýza řídicího systému	25
6.3.1	Blokový diagram řídicího systému	26
6.3.2	Výpočet pohotovosti řídicího systému	27
6.4	Spolehlivostní analýza celého objektu	27
6.4.1	Dekompozice zdrojů elektrické energie	27
6.4.2	Blokový diagram celého objektu	28
6.4.3	FMECA	28
6.5	Riziková analýza	29
6.5.1	Metoda HAZOP	29
6.5.2	FTA	30
6.5.3	ETA	31
7	Nástroj pro optimální úroveň pohotovosti	32
7.1	Návrh nástroje	32
7.2	Vstupní hodnoty	33
7.2.1	Scénáře pohotovosti	33
7.2.2	Náklady na údržbu a provoz	33
7.2.3	Náklady způsobené poruchou objektu	33
7.3	Metodologie výpočtů	34
7.3.1	Výpočet nákladů způsobených poruchou	34
7.3.2	Výpočet celkových nákladů	35
7.4	Simulace scénářů	36
7.4.1	Základní funkčnost nástroje	36
7.4.2	Robustnost nástroje	36
8	Citlivostní analýza	37
8.1	Identifikace kritických parametrů	37
8.1.1	Kvantifikace citlivosti kritických parametrů	37
8.2	Intervaly nákladů způsobených poruchou objektu	38
8.2.1	Testovací scénáře pohotovostí	38
8.2.2	Skupina konstantní sazby	38
8.2.3	Skupina růstové sazby	39
8.2.4	Skupina degressivní sazby	39
8.2.5	Výsledky citlivostní analýzy nákladů z poruchy	40

9	Příklad aplikace nástroje	41
9.1	Aplikace na konkrétním scénáři	41
9.1.1	Zadaná vstupní data	41
9.1.2	Odhadnutá vstupní data	42
9.1.3	Virtuální nabídky dodavatelů	42
9.1.4	Výsledky jednotlivých variant aplikace	42
9.1.5	Shrnutí výsledků aplikace na zadání Miřejovického mostu . . .	43
9.2	Stanovení mezní úrovně nepohotovosti systému	43
9.3	Stanovení požadavků na spolehlivostní a bezpečnostní ukazatele . . .	44
	Závěr	46
	Použitá literatura	47
A	Přílohy	49
A.1	Velké tabulky a obrázky	49

Seznam zkratek

ČEZ	České energetické závody (česká energetická společnost)
ETA	Event Tree Analysis (analýza stromu událostí)
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis (analýza způsobů poruch a jejich důsledků)
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (analýza způsobů poruch, jejich důsledků a kritičnosti)
FTA	Fault Tree Analysis (analýza poruchových stromů)
HAZOP	Hazard and Operability Study (studie nebezpečí a provozuschopnosti)
MFČR	Ministerstvo financí České republiky
MS	Microsoft
MTBF	Mean Time Between Failures (průměrná doba mezi poruchami)
MTTR	Mean Time To Restoration (průměrná doba obnovy)
PLC	Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)
RPN	Risk Priority Number (číslo priority rizika ve FMEA)
TEN-T	Trans-European Transport Network (transevropská dopravní síť)
UPS	Uninterruptible Power Supply (nepřerušitelné napájení)

1 Úvod

Tato práce slouží k analýze a stanovení spolehlivosti a bezpečnosti zvedacího mostu v Měřejovicích nad řekou Vltavou. Jedná se o projekt ve fázi plánování, který by se měl uskutečnit v rámci projektu Modernizace vltavské vodní cesty [15]. Tento projekt by měl zvýšit kapacitu a zlepšit celkovou splavnost Vltavy mezi Prahou a soutokem s Labem v Mělníce. V době psaní tohoto dokumentu (2024-2025) jsou již modernizované plavební komory a mosty nad celým Vraňansko-hořínským plavebním kanálem, tím pádem je pro dokončení projektu nutné postupně modernizovat i další vodní díla proti proudu řeky [15]. Prvním vodním dílem následujícím přímo za plavebním kanálem jsou právě zdymadla v Měřejovicích. V rámci realizace evropského projektu TEN-T je nutné navýšit parametry plavebních cest. To znamená, že je nutné zvýšit ponor z 1,8 metrů na 2,2 metrů. Dále se má navýšit minimální výška mostů nad koridory z 4,5 metrů na 7 metrů [15]. Právě tato změna minimální výšky je důvod, proč je nutné také vedle zvětšení plavební komory, upravit stávající most, který nad ní Vltavu přetíná. Jelikož se jedná o most s historickou hodnotou, je nutné při plánování a realizaci jeho modernizace dbát na tyto historické hodnoty. Vzhledem k plánování zavedení zvedacího mechanismu bylo rozhodnuto, že bude zrekonstruován i celý zbytek mostu.

Cílem tohoto projektu jsou spolehlivostní a bezpečnostní požadavky pro potenciálního dodavatele. Na základě těchto hodnot dodavatel zhotoví projekt, který bude schopen zajistit dostatečně plynulý chod zvedacího mostu nebo jiných staveb. Takto stanovené hodnoty zajistí chod objektu s minimálními ztrátami pro provozovatele a co nejvyšší mírou bezpečnosti.

Od spolupracující organizace Povodí Vltavy, s.p., autor tohoto projektu obdržel základní informace a některá data týkající se finanční škody v závislosti na čase, kdy by bylo zvedací zařízení mimo provoz.

2 Teoretický rámec

2.1 Terminologie využívaná ve spolehlivosti

V kontextu spolehlivosti se využívá několik termínů, které jsou nejčastěji přeloženy z anglického jazyka. Pro správné pochopení veškerých následujících textů je nutné nejprve stručně vysvětlit spolehlivostní terminologii.

1. **Spolehlivost (Dependability)** - Schopnost objektu nebo komponenty fungovat tak, jak je požadováno, a tehdy, když je to požadováno [4]. Spolehlivost zastřešuje níže popsané pojmy **pohotovost**, **bezporuchovost**, **udržovatelnost** a další.
2. **Pohotovost (Availability)** - Schopnost objektu být ve stavu, kdy funguje tak, jak je požadováno [4]. Vyjadřuje se také jako výše pravděpodobnosti nebo v procentech. Značeno písmenem **A**.
3. **Bezporuchovost (Reliability)** - Schopnost fungovat v daných podmínkách během daného časového intervalu bez poruchy tak, jak je požadováno [4]. Lze ji vyjádřit, jako pravděpodobnost bezporuchového provozu od 0 do 1, že v daném čase dojde k poruše. Značeno písmenem **R**.
4. **Udržovatelnost (Maintainability)** - Schopnost objektu v daných podmínkách používání a údržby být udržen ve stavu nebo být navrácen do stavu, kdy funguje tak, jak je požadováno [4]. Udržovatelnost je vyjadřována jako jednotka času, která je průměrně potřeba k uvedení systému opět do chodu. Udržovatelnost lze kvantitativně vyjádřit ukazatelem střední doby do obnovy **MTTR**.
5. **Redundance (Redundancy)** - Početní zálohování objektu nebo komponenty často řešena duplicitními prvky pro zvýšení spolehlivosti. Výše zálohování je uváděna v počtu duplicitních jednotek. Označováno **N+počet záložních komponent**.

2.2 Metody spolehlivostní a rizikové analýzy

Výpočet **spolehlivosti** je vysoce ovlivněn množstvím informací, dostupných pro výpočet. Takovéto informace by měly být dodány výrobcem komponenty anebo je lze získat testováním. Spolehlivost dále pracuje s takzvanými jevy a stavy. Jevem je zde přechodová událost mezi stavy. To znamená že stav může být například, že objekt je použitelný nebo porouchaný. Na druhé straně jevem může například být samotná porucha nebo obnova. Pro výpočet bezporuchovosti se používají pravděpodobnostní ukazatele, jako například Studentovo, Weibullovo a další rozdělení. Dále se zde pracuje s faktem, že systémy mají životní cyklus popsán funkcemi.

Riziko je založeno na náhodě a lze ho vypočítat pomocí součinu pravděpodobnosti a výše vyčísleného důsledku. K těmto dvěma veličinám se dále přidávají další, jako například detekovatelnost, expozice a mnoho dalších. Jedná se o multioborovou problematiku, s možnou aplikací v mnoha technických i netechnických oborech. Jedná se o pravděpodobnostní problematiku, což znamená, že u výpočtu rizika se využívají výhradně zkušenosti nebo nasbíraná statistická data. U problematiky je nutné rozlišovat termíny **Důsledek** a **Následek**. Důsledkem je chápána skutečnost spojená s příčinou, na druhé straně následek je termín používán v kontextu neovlivnitelné příčiny, například přírodní katastrofy. Důsledek může být obecně negativní, ale také pozitivní.

2.2.1 Ukazatele MTBF a MTTR

Pro ukazatele, vyjadřované v průměrném počtu hodin do obnovy nebo do selhání systému se obecně ve spolehlivosti používá dvojice zkratk MTBF a MTTR.

MTBF (Mean Time Between Failures) vyjadřuje střední (průměrný) čas do poruchy. Pro jeho výpočet je nutné znát míru poruchovosti systému, jelikož se jedná o její převrácenou hodnotu.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

MTTR (Mean Time To Restoration) vyjadřuje střední dobu do obnovy systému, která se uvádí obvykle v hodinách. Tuto hodnotu lze vypočítat následujícím vztahem.

$$MTTR = \frac{\text{Celkový čas strávený obnovami}}{\text{Počet obnov}}$$

2.2.2 Metody FMEA a FMECA

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) a **FMECA** (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis) jsou metody zabývající se analýzou a hodnocením potenciálních poruch v technickém prostředí. Tyto metody jsou vhodné pro několik etap životního cyklu produktu, počínaje etapou vývoje a koncepce, až po etapu likvidace

a recyklace. To znamená, že tato metoda je velice flexibilní a vhodná pro širokou škálu aplikací v sektoru spolehlivosti, například pro použití v této práci.

2.2.3 Blokový diagram bezporuchovosti

Blokový diagram bezporuchovosti je nástroj sloužící k analýze způsobu zapojení komponent v systému. Blokovým diagramem lze snadno rozlišit, zda se jedná o sériově nebo paralelně zapojený systém. Tento rozdíl v topologii zapojení je kritický při výpočtu spolehlivostních ukazatelů. V tomto případě jej autor projektu využil na zjednodušený výpočet pohotovosti systému zvedacího mostu.

2.2.4 Analýza HAZOP

HAZOP (Hazard and Operability study) je metoda určena k identifikaci nebezpečných stavů zařízení. Odhalení potenciálního řešení není primárním výsledkem zkoumání, ale tím je odhalení všech možných způsobů poruch objektu a jejich příčin. Jedná se o týmovou metodu obvykle prováděnou formou brainstormingu či otevřené diskuse. Z tohoto týmu se následně vybere jeden vedoucí, který vytvoří kolekci takzvaných vodících slov. **Vodící slova** jsou taková slova, která slouží k porovnávání nízkožádaného stavu se stavem optimálním. Taková slova mohou být například: *VYŠŠÍ*, *NIŽŠÍ*, *JINÝ NEŽ* a podobné. K těmto vodícím slovům je dále přiřazen takzvaný *význam*. To jsou obvykle heslovité věty, sloužící k případnému dovysvětlení vodícího slova. Celá metoda je normalizována, což znamená, že postupy a termíny jsou předem stanoveny a mezinárodně uznávány dle normy **ČSN EN 61882:2016** o nebezpečí a provozuschopnosti. Metoda HAZOP se ovšem neobchází bez svých limitací. Její největší omezení je fakt, že metoda posuzuje odchylky od stanoveného stavu u všech částí zvlášť. To může mít za důsledek možné přehlédnutí faktorů, které vzájemně působí na několik částí systému naráz. Tyto faktory lze odhalit pomocí metody FTA (Fault Tree Analysis), sloužící k odhalení kombinací chyb, které mohou zapříčinit nežádoucí události. Studie HAZOP nedokáže odhalit všechny potenciální chyby systému, proto by obecně analýza rizik kteréhokoli systému nikdy neměla stát pouze na výsledku této metody, ale měla by být založena na kombinaci metod zmíněných v této kapitole.

2.2.5 Metoda FTA

Analýza stromu poruchových stavů (FTA) je deduktivní metoda, která uvažuje jedno předem určené selhání a k němu stanovuje jeho možné příčiny. Toto předem určené selhání se nazývá **Vrcholovou událostí**, z které se za pomoci logických operátorů větví další předcházející události. Tímto způsobem lze určit, jaká kombinace událostí dokáže vyvolat tu událost vrcholovou.

2.2.6 Metoda ETA

Analýza **Stromu událostí (ETA)** je induktivní metoda, která používá dvoustavovou logiku pro analýzu možných scénářů při různých kombinacích stavů systému. Tato metoda je vhodná pro rizikovou analýzu, při které díky ETA metodě lze odhalit důsledky vrcholové události z FTA analýzy. Tímto postupem se v analýze větví možné scénáře podle úspěchu či selhání obranné funkce.

2.2.7 Matice rizik

Matice rizik je nástroj považující poměr mezi pravděpodobností výskytu a důsledku událostí. Toto jsou právě dva členy nutné k výpočtu hodnoty rizika. Její hodnotě je následně přidělena kategorie od Nepřípustné (velmi vysoká pravděpodobnost výskytu a Katastrofický důsledek) po Zanedbatelné (Nepravděpodobné s žádným vlivem na bezpečnost).

3 Popis technického stavu mostu

Miřejovický most je celkem 285,5 metrů dlouhá stavba přetínající řeku Vltavu a tím spojující obce Nelahozeves a Veltrusy. Jedná se o přibližně 120 let starý most vysoký téměř 5,7 metru nad hladinou řeky. Celý most je rozdělen do celkem pěti polí, číslovány vzestupně od břehu obce Nelahozeves. Aktuálně je plánována rekonstrukce celého mostu, jelikož v aktuálním období chátrá a tím pádem je neprůjezdný motorovým vozidlům. V rámci rekonstrukce Miřejovického mostu je kompletní modernizace aktuálního objektu, zavedení zvedacího pole nad kanálem zdymadel a přístavby lávky pro inženýrské sítě [6].

3.1 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce celého mostu je tvořena ocelovými nýtovanými nosníky a příčnickami. Celá tato konstrukce je nasazena na celkem sedmi mohutných kamenných pilířích. Druhé pole mostovky bude při rekonstrukci zcela demontováno a nahrazeno zvedacím polem. To bude usazeno na druhý pilíř P2 a jezový pilíř P23. Pro zavedení zvedacího mechanismu bude nezbytné upravit stávající hlavy pilířů o robustní betonovou konstrukci schopnou nést mostové pole se zvedacími mechanismy. Toto zvedací pole bude následně stát na páru rozpojitelných ložisek na sloupu P2. Na opačném konci bude toto pole dosedat na speciálně upravený kloub ve svislici vedlejšího pole [6].

3.2 Zvedací mechanismus

Zvedací mechanismus bude založen na celkem čtyřech hydraulických válcích umístěných na vrcholcích pilířů, které budou zvedat druhé pole P2 o celkem 1340mm. Součástí zvedacího mechanismu bude takzvané fixační zařízení zodpovědné za průběžné rovnání polohy a vyváženost při zvedání mostu i jeho pevnou fixaci ve vysunuté či složené pozici [6].

3.3 Plocha mostu

Plocha mostu se skládá z 5 metrů široké vozovky a dvou betonových chodníků. Tato plocha musí být při rekonstrukci zcela vyfrézována. Následně bude nutné zavést vodorovné a svislé dopravní značení na novou plochu mostovky. Pro bezpečný pohyb osob a vozidel bude následně nutné zavést světelnou signalizaci a závoru, zamezující vjetí na zvedací pole [6].

3.4 Zdroje elektrické energie

Zdrojem elektrické energie bude již zavedená napájecí přípojka pro zdymadlo. Napájena bude dosavadním dodavatelem ČEZ. Kapacita této přípojky je v aktuálním provedení pohánění pouze zdymadel téměř nedostačující, což znamená nutnost rozšíření kapacity pro pohon zdymadel i zvedacího zařízení [6].

3.5 Řídící systém

Řídící systém zvedání mostu bude řízen vzdáleným ovládáním z pozice velína zdymadel, odkud bude pověřená osoba schopna ovládat jak zdymadla, tak i samotný zdvih mostu. Co se týče ovládání náklonu zdvihu, čerpadel a hydraulických akčních členů, ty budou ovládány automaticky centrálním počítačem [6].

3.6 Inženýrské sítě

Součástí mostové konstrukce je přemostění určitých sítí elektrické komunikace a optických kabelů. Tyto kabely budou představovat překážku jak při demontáži a instalaci zvedacího pole, tak i při samotném zvedání. Toto přemostění bude řešeno zavedením statické lávky, po které tyto inženýrské sítě budou převedeny [6].

3.7 Význam mostu pro regionální ekonomiku

V České republice je průplav veřejnými plavebními komorami a využívání zdvihů veřejných mostů zcela zdarma. To znamená, že přínosem této stavby není přímý výnos z jejich provozu, ale sociální užitek z této stavby. Zvýšením maximální možné výšky plavidel, schopných proplout plavebními koridory dolní Vltavy, je předmětem plánování již několik let. Statistiky průplavů jednotlivých plavidel plavebními úseky z roku 2018 napovídají trend ústupu nákladních lodí a vzrůst lodí osobních. Tento vzrůst je nejmarginálnější v centru a okolí hlavního města Prahy. S drastickým nárůstem turismu v hlavním městě došlo k zvýšení poptávky turistických plaveb obvykle velkými komerčními plavidly. Co se ovšem týče nákladních plavidel, lze sledovat trend jasného poklesu. Hlavní přínos tohoto projektu by tedy mělo být přilákání podniků, aby využívaly říční dopravu, jak pro vnitrostátní, tak mezistátní nákladní dopravu. Tato migrace ze silniční a z části železniční dopravy by znamenala velké ušetření jak ze strany podniků, tak ze strany státu. Náklady na udržování silniční infrastruktury a vypořádávání se s ekologickými dopady silniční dopravy jsou mnohem vyšší, než ty na lodní dopravě [7].

4 Ekonomické zhodnocení projektu

Jelikož se jedná o projekt ve fázi plánování, autor tohoto projektu se bude odrážet od hodnot vycházejících z úpravy Hořínské plavební komory. Vysvětlení tohoto rozhodnutí je zmíněno v úvodu této práce. Veškeré informace a částky o těchto projektech vycházejí ze studie vzniklé v době prvního roku investice 2014, s předpokládanou dobou realizace 5 let. Veškeré cenové úrovně byly vypočteny s diskontní sazbou 5,5%, což je dle autora uvažování dostatečně reálné, možná příliš konzervativní. Provozní fáze projektu investice byla stanovena na 30 let, což znamená do roku 2049 [14].

4.1 Predikce ekonomického vývoje na dobu investice

Před odhadováním jakýchkoli ekonomických ukazatelů investice je velmi důležité vytvořit si predikci vývoje vnějšího ekonomického prostředí systému. Investiční analýza zmíněna v úvodu této kapitoly, na základě které byly podobné projekty zhotoveny, je v době psaní tohoto dokumentu již přes 10 let stará a proto ztrácí na aktuálnosti. Predikování ekonomického vývoje celkově je dost obtížné a ovlivňuje ho mnoho faktorů. Autor tohoto projektu se proto rozhodl ověřit si, zda předpokládaná míra diskontní sazby v původní analýze je aktuální, či nikoliv.

4.1.1 Aktuální ekonomická situace

V době psaní tohoto dokumentu ekonomika prochází velice nestabilním obdobím, vlivem politicko-ekonomických roztržek mezi Spojenými státy a zeměmi Evropské unie. Tento fakt bude výrazně komplikovat přesnost této predikce. Jelikož analýza vývoje ekonomické situace v Evropě není přímý předmět této práce, bude zde autor pracovat s jistou mírou zjednodušení. Na druhou stranu i zjednodušená predikce vývoje kladně přispěje k přesnosti výsledných predikovaných hodnot.

4.1.2 Odhad dopadu ekonomické situace na projekt

Vlivem navýšení cel mezi Spojenými státy a zeměmi Evropské unie lze do jisté míry očekávat několik reakcí trhu. Na prvním místě se zdrazí komponenty a díly poptávané ze Spojených států. Na druhé straně je možnost navýšení úzké obchodní kooperace mezi jednotlivými státy uvnitř Evropské unie. Tento vývoj by následně přispěl k většímu využití tohoto projektu.

Na druhou stranu jednou z největších výhod lodní dopravy je efektivita poměru množství přepraveného nákladu ku množství vypuštěných emisí skleníkových plynů. Tato myšlenka byla jedním z hlavních předmětů systému TEN-T, který mimo lodní dopravy chtěl převést transport nákladu ze silniční na také efektivnější železniční dopravu. Otázka ekologie je v aktuální evropské politice mírně upozadována na úkor upevňování jak průmyslové, tak vojenské soběstačnosti Evropy.

Co se ale týče výdajů na údržbu infrastruktury, je silniční doprava stále nejdražší položkou. Důvodem jejího odlehčení pomocí železniční a hlavně říční dopravou proto není na prvním místě ekologická zátěž, ale mnohonásobně nižší výdaje na transportovaných tisíc tun na kilometr.

4.1.3 Index cen stavebních děl do roku 2024

Index cen stavebních děl vyjadřuje průměrnou výši celkovou výši nákladů na výstavby. To zahrnuje jak stavební práce, tak i nákup materiálu, dopravy a strojů. Data indexů cen stavebních děl autor dokumentu získal z oficiálních dokumentů vydaných českým statistickým úřadem. Tato data jsou rozčleněna do jednotlivých kategorií, což umožňuje zobrazit cenové indexy týkající se pouze mostů.

Jednotlivé hodnoty cenových indexů značí rozdíl změny tzv. základním roku který zde slouží jako referenční hodnota. V těchto analýzách byl zvolen rok 2015 s hodnotou 100. V ostatních rocích například změna na 104,5 znamená navýšení cenové hodnoty o 4,5% [14].

Rok	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Cenový index	102,9	106,5	112,0	116,6	123,0	140,2	146,6	149,5

Tabulka 4.1: Tabulka historických hodnot indexu cen stavebních děl (2012 - 2019) [14].

4.1.4 Predikce vývoje diskontní sazby

Při úvaze doby investice 5 let trvajících od roku 2025 do roku 2030 autor čerpal hlavně z dokumentů vypsanych MFČR. Tyto dokumenty obsahovaly výhled do roku 2027. Další hodnoty proto autor odhadl na základě předpokladu uvedeném v původní studii z roku 2014. Tato studie uvádí tempo vývoje 2% za rok v období 2020 - 2030 [5].

Rok	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Cenový index	151.4	154.9	158.2	161.4	164.6	167.9	171.3

Tabulka 4.2: Tabulka predikcí hodnot růstu cenového indexu (2024 - 2030) [5].

5 Náklady související s projektem

Celkové investiční náklady úpravy Hořínské plavební komory činily necelých 183 milionů Kč. Proto lze očekávat, že se částka na modernizaci Měřejovického mostu bude pohybovat v podobných výškách [14]. Předpokládané náklady na údržbu, provoz a revizi Měřejovického mostu byly vyčísleny na 413 699 Kč/rok [13]. Tato částka dále bude sloužit jako základ pro výpočet optimální pohotovosti objektu.

5.1 Provoz objektu

Roční provoz autor vyčíslil ze statistik sesbíraných mezi lety 2011 - 2018 na přibližných 250 osobních, 2000 nákladních a 1500 malých plavidel [16] [7]. To znamená přibližných 3500 - 4000 průplavů Měřejovickými zdymadly za rok. Jelikož tato práce pojednává pouze o plavidlech, které vyžadují zdvih mostu, bude se zde uvažovat pouze část z tohoto výčtu.

5.1.1 Velké osobní kabinové lodě

Součástí dokumentu hodnotícího ekonomickou efektivnost povodí je také predikce počtu proplutí velkých osobních kabinových lodí. Tato predikce končila rokem **2035**, což je méně, než stanovená životnost objektu. Tudíž autor na základě informací získaných v dalších ekonomických analýzách predikoval hodnoty až do roku **2055**.

Rok	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Průplavy / rok	90	110	130	143	153	165	180	200

Tabulka 5.1: Tabulka predikovaných hodnot četností proplutí **velkých osobních kabinových lodí** zdymadly v Měřejovicích za rok [16].

5.1.2 Nákladní a jiné lodě

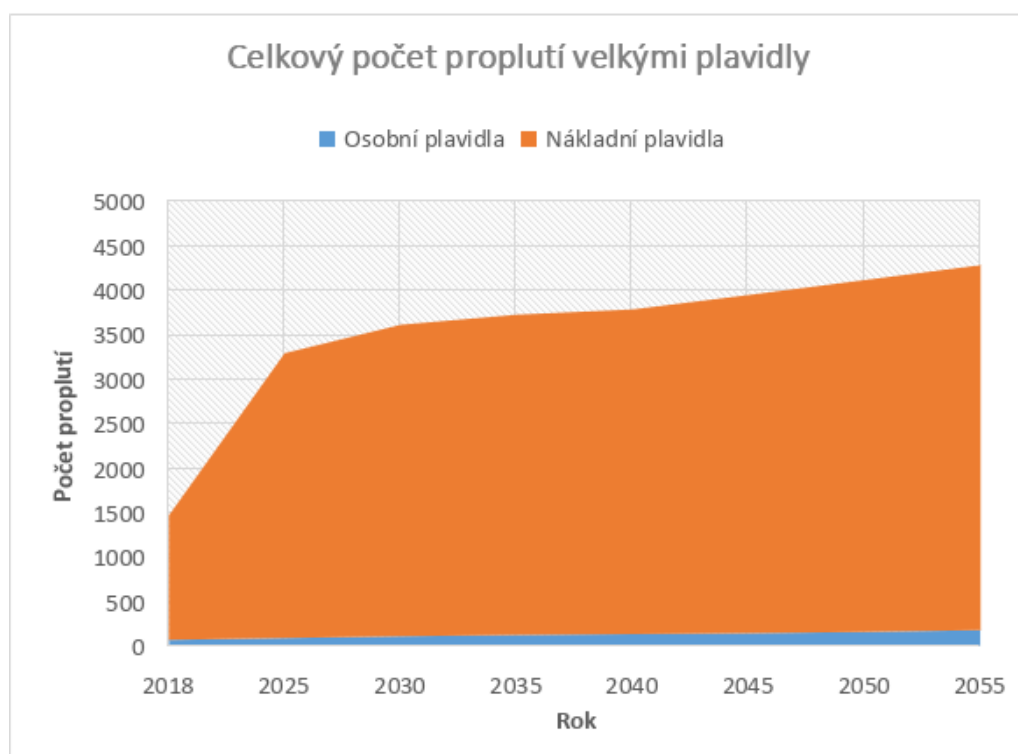
V době psaní tohoto dokumentu nebyla provedena žádná predikce budoucích četností proplutí nákladních lodí zdymadly v Měřejovicích. Autor tohoto dokumentu bude tedy vycházet z dat zpracovaných ve výše zmíněné studii z roku 2019. Součástí analýzy predikující vývoj nákladní dopravy byla predikce potenciálního zvýšení říční přepravy surovin. Tato predikce vykazuje jasné zvýšení množství transportovaného

nákladu říční dopravou, v některých případech až o 240%. Toto navýšení se ovšem téměř okamžitě ustálí [7].

Rok	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
Průplavy / rok	1400	3200	3500	3600	3650	3800	3950	4100

Tabulka 5.2: Tabulka predikovaných hodnot četností proplutí **nákladních a jiných lodí** zdymadly v Měřejovicích za rok [7].

Z těchto predikcí jsou následně hodnoty sečteny a zobrazeny v následujícím grafu.



Obrázek 5.1: Graf celkových proplutí nákladních i osobních plavidel.

5.2 Náklady způsobené nefunkčností zvedacího mostu

5.2.1 Četnost znemožnění průplavu

Při vyčíslování nákladů způsobených nefunkčností objektu je důležité si uvědomit jeho podstatné okolí. Měřejovická plavební komora je pouze jedním prvkem v dlouhém řetězci několika dalších vodních děl. Pokud je brána v potaz pouze dolní Vltava, jedná se o 91.5 kilometrů dlouhý úsek od plavební komory v Štěchovicích po Hořínskou plavební komoru. Tato skutečnost znamená, že v momentu nefunkčnosti

zvedacího mostu není většina plavidel ovlivněna. Plavidla směřující k Miřejovické plavební komoře se totiž mohou nacházet různě na tomto 91,5 kilometrů dlouhém úseku Vltavy. Do výpočtu nákladů způsobených nefunkčností zvedacího mostu je tím pádem nutné tento fakt zakomponovat.

5.2.2 Rozlišení typů závad

Autor tohoto projektu se rozhodl rozdělit možné závady do pěti kategorií. První kategorií jsou **zanedbatelné**. Pod ty je možné zařadit opotřebení hydraulických systémů, některých čidel a podobné závady ne nutně znamenající nemožnost průplavu pod objektem. Druhou kategorií jsou **Nezávažné závady**. Těmito závadami lze chápat poruchy, které již mají vliv na funkčnost objektu, ale jejich nízká četnost vyvažuje dobu, kdy je objekt mimo provoz. Třetí kategorii autor zvolil **Přípustné závady**. Mezi ty patří částečná nefunkčnost kritických komponent. To může znamenat zablokování průplavu na dobu až několika dní. Jejich roční četnost je stále dost nízká na tolik, že jsou pro provozovatele přípustné. **Nežádoucí závady** Jsou takové závady, které znamenají vyřazení objektu mimo provoz zpravidla na několik dní. Může se jednat o poruchy na kritických komponentech, které nejsou zálohovány. **Kritickými závadami** lze chápat například zablokování zvedacího mechanismu nebo vážné závady na konstrukci. Tyto závady zamezí průplavu na dobu až několik desítek dní. Poslední kategorií jsou **nepřípustné poruchy**. Tyto poruchy mají zpravidla katastrofální dopad a znamenají kompletní rekonstrukci objektu. Autor následně tuto kategorizaci znázornil pomocí matice rizik.

Četnost výskytu poruchy	Doba objektu mimo provoz				
	1 1-3 dny	2 3-6 dny	3 6-15 dní	4 15-30 dní	5 30 a více dní
5: Velmi vysoká - [>20x za rok]	Kritické	Kritické	Nepřípustné	Nepřípustné	Nepřípustné
4: Vysoká - [5x za rok]	Přípustné	Nežádoucí	Nepřípustné	Nepřípustné	Nepřípustné
3: Střední - [0,8x za rok]	Nezávažné	Přípustné	Nežádoucí	Kritické	Nepřípustné
2: Nízká - [0,2x za rok]	Zanedbatelné	Nezávažné	Přípustné	Nežádoucí	Kritické
1: Velmi nízká - [0,02x za rok]	Zanedbatelné	Zanedbatelné	Nezávažné	Přípustné	Nežádoucí

Obrázek 5.2: Matice rizik rozlišující kategorie závad.

6 Analýza spolehlivosti a rizik pro zvedání mostu v Miřejovicích

6.1 Dekompozice systému

Spolehlivostní a rizikové analýzy je možné provádět s různou mírou přesnosti. Autor tohoto projektu se proto musel rozhodnout do jaké hloubky bude tuto dekompozici provádět. Příliš *mělká* dekompozice by znamenala významné zkreslení výsledků. Na druhou stranu, přehnaně podrobná by znamenala zbytečně velkou časovou a znalostní zátěž na zpracovatele.

6.1.1 První úroveň dekompozice

První úroveň dekompozice rozčlenění systém na jeho základní subsystémy. Těmi jsou **Hydraulický systém**, **Zdroje elektrické energie**, **Řídicí systémy** a **Nosná konstrukce objektu**.

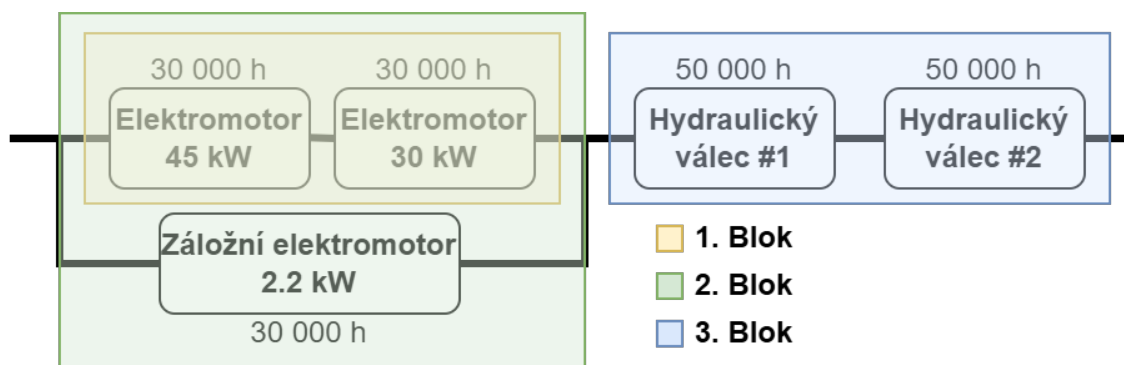
Téměř veškeré komponenty u takovýchto projektů se dělají na zakázku, to znamená, že je velice obtížné získat jakékoliv technické údaje týkající se spolehlivosti. Autor tohoto projektu tudíž udělal průzkum internetu, kde zjistil rozsah spolehlivostního ukazatele **MTBF** u kritických komponent. S těmito úrovněmi nadále pracoval počínaje nejnižšími hodnotami (nejméně spolehlivé) až po ty nejvíce spolehlivé.

6.2 Spolehlivostní analýza hydraulického systému

Při vytváření dalších úrovní dekompozice lze pozorovat nárůst náročnosti každé další úrovně. **Hydraulický systém** lze dále rozčlenit na:

- Hydraulický válec (4x).
- Hydraulická čerpadla (2x).

6.2.1 Blokový diagram hydraulického systému



Obrázek 6.1: Blokový diagram hydraulického systému s vypsányi MTBF jednotlivých komponent.

Z blokového diagramu výše lze vyčíst způsob fungování systému. Ten je primárně sériově zapojený, jelikož redundance těchto prvků hydraulického systému je finančně nevýhodná. Raději je zde investováno do pravidelných údržeb a dílů s vysokou mírou spolehlivosti [17].

6.2.2 Výpočet pohotovosti hydraulického systému

Systémy, které obsahují jak sériové, tak paralelní zapojení komponent je vhodné si rozdělit do jednotlivých podbloků. Tyto bloky jsou v obrázku odlišeny barvami. Nejprve autor vypočítal pohotovost **oranžového bloku**, s kterým dále pracoval jako s jedním blokem. Takto postupoval, až do bodu, kdy dopočítal pohotovost celého systému. [9] [2].

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$A = \frac{30000}{30000 + 12} \approx 0.9996$$

$$A(\text{1. Blok}) = 0.9996 \cdot 0.9996 \approx 0.9992$$

$$A(\text{2. blok}) = 1 - \prod_{i=1}^2 1 - A(i) = 1 - [(1 - 0.9992) \cdot (1 - 0.9996)] \approx 0.99999$$

$$A(\text{3. Blok}) = 0.9995 \cdot 0.9995 \approx 0.999$$

$$A(\text{Hydr. systém}) = 0.9999 \cdot 0.999 \approx \mathbf{0.9989}$$

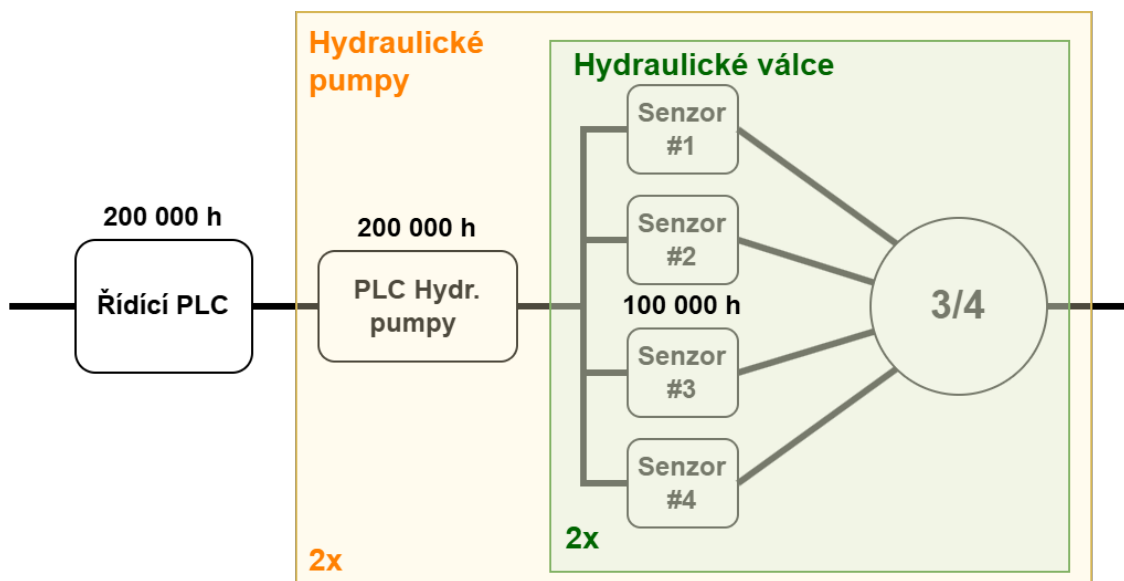
6.3 Spolehlivostní analýza řídicího systému

Autor tohoto dokumentu se rozhodl uvažovat pouze s lokálním řídicím systémem. Řídicí systém se dále dekomponuje na:

- Snímače polohy (4 na každém válci).
- Řídící průmyslové počítače PLC (3x).

6.3.1 Blokový diagram řídicího systému

Do subsystému řídicí systém autor zařadil také veškeré senzory. Ty jsou dle oficiální dokumentace 4 na každém z válců. Na základě této informace autor vyhodnotil, že budou nejspíše zapojeny způsobem 3 ze 4. Tento způsob zapojení senzorů je široce používaný, například v energetice [3].



Obrázek 6.2: Blokový diagram řídicího systému s vypsányi MTBF jednotlivých komponent.

6.3.2 Výpočet pohotovosti řídicího systému

Opět, jako u výpočtu pohotovosti hydraulického systému, řídicí systém autor rozdělil do jednotlivých bloků. Pohotovost senzorů zapojených logikou 3 ze 4 lze vypočítat jako součet pravděpodobností, že budou fungovat 4 nebo 3 senzory [10] [8].

$$A(\text{senzorů}) = A(4 \text{ fungují}) + A(3 \text{ fungují})$$

$$A(4) = A^4 = 0.9999^4 \approx 0.9996$$

$$A(3) = \binom{4}{1} A^3 (1 - A) = 4A^3 (1 - A)$$

$$A(3) = 4 \cdot 0.9999^3 \cdot (1 - 0.9999) \approx 0.00039$$

$$A(\text{senzorů}) = 0.9996 + 0.00039 = \mathbf{0.99999}$$

Jelikož řídicí systém má celkem 2 hydraulické pumpy a 4 hydraulické válce, musí se výsledek pohotovosti senzorů ($A(\text{senzorů})$) umocnit čtyřmi a hodnotu pohotovosti PLC ($A(\text{PLC})$) dvěma.

$$A(\text{PLC}) = 0.99996 \cdot \text{rok}^{-1}$$

$$A(\text{Řídicího systému}) = 0.99996^3 \cdot 0.99999^4 \approx \mathbf{0.99984}$$

6.4 Spolehlivostní analýza celého objektu

6.4.1 Dekompozice zdrojů elektrické energie

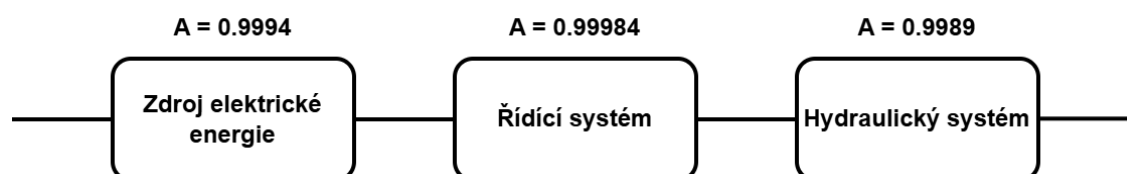
- Primární přípojka ČEZ.
- Záložní UPS (2x).

Zdroj elektrické energie u tohoto objektu lze brát jako sériově zapojený systém dvou UPS (každá na jednu hydr. pumpu) a záložního agregátu. Primární přípojku ČEZ autor do výpočtu neuvažoval, jelikož je velice stabilní a při výpadku je ihned nahrazena UPS a záložním agregátem [11] [12] [1].

$$A(\text{el. zdroj}) = 0.9998^2 \cdot 0.9998 \approx 0.9994$$

6.4.2 Blokový diagram celého objektu

Pro výpočet pohotovosti celého systému stačí následně vynásobit hodnoty pohotovostí jednotlivých komponent, jelikož jsou sériově zapojeny.



Obrázek 6.3: Blokový diagram celého systému s vypočtenými hodnotami pohotovosti.

$$A(\text{Celého systému}) = 0.9994 * 0.99984 * 0.9989 = \mathbf{0.99841}$$

Celkový počet dní mimo provoz za rok = $(1 - 0.99841) * 365 \approx 0.58 = 13,9$ hodin.

Výsledná hodnota pohotovosti vyšla **0.99841**, což lze interpretovat tak, že objekt bude mimo provoz necelých 14 hodin za rok.

Tento výpočet je ovšem prováděn na straně dodavatele, který nastaví jednotlivé komponenty tak, aby zadavateli projektu nabídl několik variant technických řešení s rozdílnou mírou pohotovostí. Zadavatel projektu (v tomto případě povodí Vltavy s.p.) následně může kontaktovat více dodavatelů a rozhodnout se, mezi jejich jednotlivými návrhy řešení.

6.4.3 FMECA

Autorem vypracovaná **FMECA** analýza je v tomto případě důležitá pro zjištění, které komponenty jsou z hlediska spolehlivosti kritické. Dalším výsledkem FMECA analýzy jsou možné režimy selhání a jejich navrhované opatření. Základem analýzy byly komponenty vyobrazeny v blokových diagramech výše v dokumentu.

Komponenta	Režim selhání	Efekt	Závažnost	Výskyt	Detekce	RPN	Navrhované opatření
El. motor	Přehřátí / Porucha	Ztráta pohonu	9	4	3	108	Termoochrana, pravidelné kontroly
Záložní El. motor	Porucha přepnutí	Nemožnost snížení při výpadku	8	3	6	144	Pravidelné testování
Hydraulický válec	Únik kapaliny	Snížená síla / výpadek zvihu	9	4	4	144	Preventivní kontroly a výměny těsnění
Hadice	Prasknutí / Prodření	Únik kapaliny	8	4	5	160	Kontroly tlaku
Řídicí PLC	Porucha HW	Výpadek celého systému	10	2	1	20	Redundance řídicího systému
PLC Hydr. pumpy	Porucha HW	Pumpa se nespustí, výpadek zdvihu	9	3	1	27	Redundance řídicího systému
Senzorika	Chybný signál	Špatná reakce systému	8	7	3	168	Redundance senzorů, samotesty
Přípojka ČEZ	Výpadek sítě	Nemožnost manipulace	7	2	1	14	Záložní síť
Záložní agregát	Nenastartuje	Systém bez proudu	9	3	8	216	Pravidelné testování
UPS	Selhání baterie	Výpadek napájení PLC	8	4	3	96	Monitoring stavu baterii

Obrázek 6.4: FMECA analýza systému zvedacího mostu.

Z vypracované FMECA analýzy vyplývá, že nejkritičtější komponenty pro správný chod objektu jsou: záložní agregát, senzory, hydraulické hadice a další části hydraulického systému. Nejvyšší hodnotu RPN (Číslo priority rizika) v systému má záložní generátor elektrické energie. Důvodem je kombinace vysoké závažnosti a obtížné detekce jeho poruchy. Jako opatření je proto vhodné naplánovat pravidelné

testování funkčnosti agregátu. Na druhou stranu sensorika, které v analýze vyšlo druhé nejvyšší prioritní číslo je v tomto projektu již vhodně ošetřena. V systému jsou senzory zálohovány čtyřnásobně, což výrazně zvyšuje spolehlivost řídicího systému.

Po identifikaci kritických komponent je následně vhodné zvážit nákup vyššího množství záložních kusů pro rychlou výměnu při poruše a tím nejméně omezit splavnost pod mostem.

Pro vyšší přesnost je vhodné s FMECA analýzou pokračovat na další stupně dekompozice. Tímto by bylo možné odhalit kritické sub-komponenty již rozčleněných komponent z první úrovně.

6.5 Riziková analýza

6.5.1 Metoda HAZOP

Pro analýzu možných rizik v systému zvedacího mostu autor následně provedl HAZOP analýzu. Obdobně, jako u [Blokový diagram hydraulického systému](#) spolehlivostní analýzy autor metodu HAZOP aplikoval na dekomponovaný systém na tři sub-systémy. Těmi jsou hydraulický, řídicí systém a zdroj elektrické energie.

Pomocí těchto jednotlivých analýz byl autor schopen systematicky analyzovat možné odchylky od standardního provozu a následně navrhnout opatření k minimalizaci rizika.

Pro demonstraci zde autor uvedl pouze **HAZOP** analýzu hydraulického systému. HAZOP analýzy pro zbylé subsystémy (řídicí systém a zdroje elektrické energie) autor pro přehlednost umístil do kapitoly přílohy (viz. [Přílohy](#)).

HAZOP - Hydraulický systém					
Komponenta	Parametr	Vodící slovo	Příčina	Důsledek	Opatření
Čerpadlo	Tlak	Žádný	Porucha čerpadla	Nefunkční hydraulika	Redundance pohonné jednotky
Čerpadlo	Tlak	Nízký	Porucha čerpadla, únik kapaliny	Omezený výkon hydrauliky	Monitorování tlaku, zvýšená údržba
Čerpadlo	Tlak	Vysoký	Porucha ventilu	Poškození systému	Redundance ventilů
Rozvody	Tlak	Žádný	Prasklé rozvody	Nefunkční hydraulika	Zvýšená odolnost, pravidelné kontroly
Rozvody	Tlak	Nízký	Prasklé rozvody, netěsnost spojů	Omezený výkon hydrauliky	Pravidelné kontroly
Válce	Pohyb	Žádný	Chyba řídicí jednotky, nedostatek tlaku	Nemožnost ovládání	Redundance řídicí jednotky
Válce	Pohyb	Jiný, než	Chyba řídicí jednotky	Částečná nemožnost ovládání	Redundance řídicí jednotky

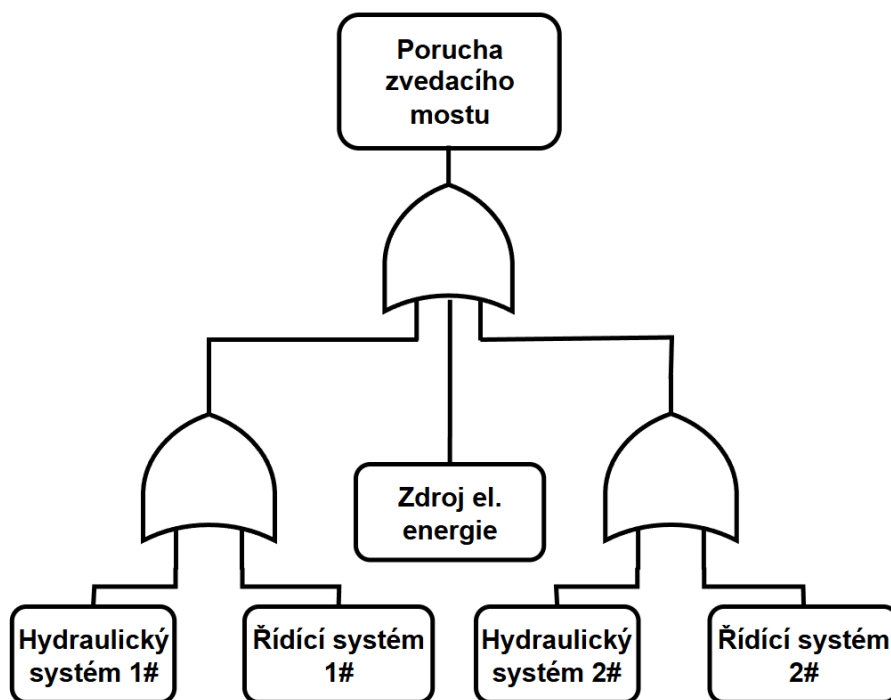
Obrázek 6.5: HAZOP analýza hydraulického systému zvedacího mostu.

Výsledkem HAZOP analýzy hydraulického systému bylo tabulkové posouzení možných příčin poruch jednotlivých komponent hydraulického subsystému. K těmto možným příčinám byl následně přidělen důsledek a jeho možné opatření.

Za kritické byly díky HAZOP analýze identifikovány hlavně poruchy ventilů, rozvodů a samotných pohonných jednotek čerpadel.

6.5.2 FTA

Následně autor vypracoval **FTA** analýzu pro jednotlivé sub-systémy a na celý systém jako takový. Tato analýza je ve své podstatě podobná blokovému diagramu uvedeném výše (viz. [Analýza spolehlivosti a rizik pro zvedání mostu v Miřejovicích](#)). Poskytuje ale více "negativní" pohled na systém, kde na rozdíl od blokového diagramu, který hledá, co musí fungovat, FTA analýza hledá spíše co musí selhat, aby spadl celý systém.



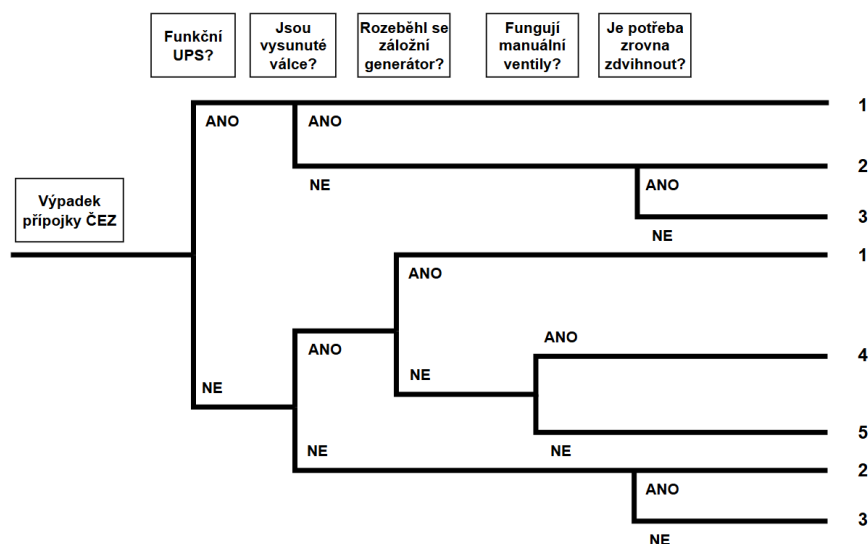
Obrázek 6.6: FTA analýza celého systému s jednotlivými subsystémy.

Tato analýza pomohla autorovi vizualizovat, které poruchy by mohly vést k selhání celého systému. Tato kritická místa jsou jednoznačně zdroj elektrické energie a elektrické motory hydraulických pump.

FTA analýzy veškerých sub-systémů autor vložil do kapitoly [Přílohy](#).

6.5.3 ETA

Jako iniciační událost pro začátek větvení autor zvolil výpadek hlavní přípojky elektrické energie. Tato vrcholová událost je vhodná pro ETA analýzu, jelikož ovlivní téměř každý sub-systém. Autor projektu zde rozlišil možné koncové situace, kterým zřetězené poruchy předcházejí.



Obrázek 6.7: ETA analýza na událost výpadku hlavní přípojky elektrické energie.

Z této analýzy autor identifikoval 5 koncových situací s různou mírou škody. Scénáře, kde je nějaká bezpečnostní komponenta nefunkční, musí být neprodleně opravena a do té doby by objekt neměl být využíván.

- 1 - Bezpečné snížení zvedacího pole.
- 2 - Vyčkání na obnovení hlavního zdroje elektrické energie.
- 3 - Vyčkání na obnovení hlavního zdroje elektrické energie - bez omezení provozu.
- 4 - Nouzové manuální upuštění hydraulických ventilů.
- 5 - Destruktivní selhání válců v případě uvíznutí ve vysunuté pozici.

Hlavní bezpečnostní hrozba tohoto systému při výpadu elektrické energie je fakt, že pokud jsou dlouho vysunuty hydraulické válce, dochází k jejich zrychlenému opotřebování a až eventuálně k jejich poškození. Proto všechny záložní mechanismy dodávky elektrické energie jsou primárně k bezpečnému snížení zvedacího pole, než k obnovení provozuschopnosti. Z bezpečnostního hlediska by most měl být zvedán pouze pod podmínkou, že je funkční primární přípojka elektrické energie.

7 Nástroj pro optimální úroveň pohotovosti

Jedná se o nástroj v tabulkovém editoru, jako například MS Excel a podobné programy. Nástroj slouží pro prvotní odhad optimální míry pohotovosti objektu pro zadavatele projektu v rané fázi jeho plánování. Zadávání stavebních projektů funguje na principu vyhlášení soutěže o nejvýhodnější nabídku zhotovení projektu. Zadavatel (uživatel nástroje) následně zvažuje, jaká nabídka, od jakého dodavatele je ta nejvýhodnější. Jelikož se jedná o objekt s životností několik desítek let, je nutné nebrat v úvahu pouze prvotní investici vystavění objektu, ale také náklady, přicházející průběžně po dobu jeho fungování.

7.1 Návrh nástroje

Nástroj funguje na principu porovnávání jednotlivých nabídek různých stavebních společností s různými hodnotami pohotovostí objektu. Následně pomocí dalších specifikovaných nákladů (viz. [Vstupní hodnoty](#)) nástroj vypočítá celkovou výši nákladů pro každou z těchto nabídek. Tyto hodnoty jsou následně zobrazeny přímo v tabulce výsledků u každé z nabídek. Dále jsou tyto výsledky vyobrazeny v grafu, který slouží pro rychlé vizuální porovnání.

Název	Pohotovost	Celkové náklady investice
Dodavatel 1	0,76	467 547 347,82 Kč
Dodavatel 2	0,78	455 512 076,36 Kč
Dodavatel 3	0,8	434 614 623,27 Kč
Dodavatel 4	0,82	424 579 351,81 Kč
Dodavatel 5	0,84	409 544 080,36 Kč
Dodavatel 6	0,86	394 508 808,90 Kč
Dodavatel 7	0,88	381 611 355,81 Kč
Dodavatel 8	0,9	363 576 084,35 Kč
Dodavatel 9	0,92	363 540 812,90 Kč
Dodavatel 10	0,94	368 643 359,81 Kč
Dodavatel 11	0,96	378 608 088,35 Kč
Dodavatel 12	0,98	388 572 816,89 Kč

Obrázek 7.1: Výsledné hodnoty celkových nákladů pro každý scénář s zvýrazněným nejvýhodnějším scénářem.

7.2 Vstupní hodnoty

Veškerá pole určená k zadávání vstupních hodnot jsou v nástroji podbarveny žlutou barvou. Ostatní pole slouží pro výpočty a výpisy hodnot, proto by je uživatel neměl přepisovat.

7.2.1 Scénáře pohotovosti

Hlavní vstupní informací jsou hodnoty pohotovosti a náklady nutné k dosažení této výše pohotovosti. Nástroj podporuje až 12 různých scénářů pohotovostí a jejich nákladů. Uživatel nástroje dále může pro přehlednost uvádět k jednotlivým scénářům i jména dodavatelských společností.

Název	Pohotovost	Požizovací náklady
Dodavatel 1	0,76	160 000 000,00 Kč
Dodavatel 2	0,78	168 000 000,00 Kč
Dodavatel 3	0,8	170 000 000,00 Kč
Dodavatel 4	0,82	180 000 000,00 Kč
Dodavatel 5	0,84	185 000 000,00 Kč
Dodavatel 6	0,86	190 000 000,00 Kč
Dodavatel 7	0,88	200 000 000,00 Kč
Dodavatel 8	0,9	202 000 000,00 Kč
Dodavatel 9	0,92	222 000 000,00 Kč
Dodavatel 10	0,94	250 000 000,00 Kč
Dodavatel 11	0,96	280 000 000,00 Kč
Dodavatel 12	0,98	310 000 000,00 Kč

Obrázek 7.2: Scénáře nabídek v nástroji.

7.2.2 Náklady na údržbu a provoz

Dalším vstupem nástroje jsou náklady na údržbu a provoz objektu. Tyto hodnoty uživatel nástroje v takto rané fázi plánování může ale také nemusí znát. Proto je v nástroji několik možností, jak tuto informaci uvést. Uživatel ji buďto nemusí uvádět vůbec nebo ji může uvést jako hodnotu pro jednotlivé scénáře. Uživatel nástroje si ale musí dávat pozor, zda je konzistentní v udávání těchto nákladů. Pokud by například uvedl tyto náklady pouze u některých scénářů a jiné by nechal nevyplněné, tak by u výpočtu celkových nákladů byly ty specifitější znevýhodněné. Jelikož tato suma bude placena každý rok po dobu využívání objektu, což je typicky několik desítek let, autor do výpočtu zakomponoval i inflaci.

7.2.3 Náklady způsobené poruchou objektu

Náklady z poruchy objektu se zadávají ve formátu časových intervalů (ve dnech), ke kterým je přiřazena denní výše ztráty za každý den trvání poruchy v daném rozmezí. Nástroj podporuje až 6 různých intervalů.

Kontrola vstupů	Intervaly		
	Od	Do	Náklady v intervalu
-			
✓ Validní	1	7	20 000,00 Kč
✓ Validní	8	10	50 000,00 Kč
	11		30 000,00 Kč

Obrázek 7.3: Tabulka pro zadání vlastních intervalů nákladů způsobených poruchou objektu.

Podle výše výše uvedené matice kritičnosti (viz. 5.2) autor vytvořil v nástroji předem definovanou tabulku hodnot týkajících se parametrů poruch. Těmito jsou průměrná délka poruchy a počet výskytů této poruchy po dobu jednoho roku.

Toto roztrídění je kritické pro správný výpočet celkových nákladů způsobených poruchami za celou dobu životnosti objektu. Díky modularitě této funkce, může uživatel předem definované parametry poruch přepsat na takové, které odpovídají více projektů, na který je nástroj využíván.

Parametry poruch		
Kategorie poruchy	Průměrná délka poruchy [den]	Počet výskytů za rok
Velmi krátká	0,5	20
Krátká	2	5
Střední	6	0,8
Dlouhá	15	0,2
Katastrofická	30	0,02

Obrázek 7.4: Tabulka pro zadávání parametrů poruch.

7.3 Metodologie výpočtů

7.3.1 Výpočet nákladů způsobených poruchou

Nástroj nejprve z hodnoty pohotovosti vypočítá průměrný počet dní, kdy bude objekt v poruše. Příklad: Časový interval (T) = 1 rok a Pohotovost (A) = 0.97

$$\text{Počet dní v poruše} = (1 - 0.97) * 365 = 11$$

Jelikož pohotovost je čistě pravděpodobnostní veličina, je nutné si uvědomit, že těchto 11 dní z příkladu znamená součet všech poruch za rok. To znamená, že těchto 11 dní se může tedy ve výsledku skládat z několika krátkých poruch nebo na druhé straně z jedné významné, trvající celých 11 dní.

V nástroji je proto implementována funkce rozlišování různých kategorií poruchy dle jejich průměrné délky poruchy. Do tabulky uživatel vloží předpokládané hodnoty délky poruch ve dnech a jejich počet výskytů za rok. Tato kombinace hodnot je jakýsi

základ, u kterého je následně vypočten počet dní kdy je celkem objekt v poruchovém stavu (*Výsledná doba*).

Parametry poruch		
Průměrná délka poruchy [den]	Počet výskytů za rok	Výsledná doba
0,5	20	10
2	5	10
6	0,8	4,8
15	0,2	3
30	0,02	0,6
		28,4

Tabulka 7.1: Tabulka demonstrující výpočet škálovacího koeficientu z referenčního výpočtu.

Uživatel nástroje následně musí vyplnit časové intervaly a jejich náklady na každý další den trvání poruchy (viz [Náklady způsobené poruchou objektu](#)). Na základě těchto informací je následně vypočten součet výsledných dob, kterým je následně vydělen počet dní v poruše u každého scénáře zvlášť. Například u scénáře s 88 dny v poruše:

$$\text{Škálovací koeficient} = \frac{88}{28,4} \approx 3,0986$$

Tento škálovací koeficient je následně vynásoben hodnotou výsledné doby. To znamená, že například u scénáře z výše uvedeného příkladu je výsledná doba objektu mimo provoz necelých 3x tolik více, než u základního referenčního výpočtu (viz. [8.1](#)). Tato hodnota reprezentuje výsledný počet dnů v poruše z kategorie poruch s velmi krátkým trváním. Dále nástroj tuto dobu v poruše vynásobí výší nákladů určenou pro tento interval.

$$\text{Velmi krátké poruchy} = 10 \cdot 3,0986 \cdot 20000 \text{ Kč} = 619718,31 \text{ Kč}$$

Tyto náklady z jednotlivých intervalů se následně na základě počtu dní v poruše sečtou v jednu sumu. Ta je následně vynásobena počtem předpokládaných let, kdy bude objekt v provozu a indexací o inflaci 2%. Pro vytvoření obrazu výše výsledné sumy za nemožnost používání objektu po celou dobu jeho života.

7.3.2 Výpočet celkových nákladů

Výpočet celkových nákladů postupně sečte všechny jednotlivé dílčí náklady pro každou nabídku pohotovosti zvlášť. Až teprve tento finální součet dokáže opravdu porovnat jednotlivé nabídky podle jejich výhodnosti. Některé nabídky sice můžou mít nízké pořizovací náklady, ale při nízké hodnotě pohotovosti objektu toto zvýhodnění bude přebito náklady způsobené poruchou objektu a opačně (viz. [Obrázek 7.3](#)).

7.4 Simulace scénářů

7.4.1 Základní funkčnost nástroje

Za základní funkčnost nástroje autor považoval vstupní hodnoty standardního formátu, které by s nejvyšší pravděpodobností koncový uživatel mohl do nástroje zadat.

Z testování nástroje se správnými vstupními hodnotami autor usoudil, že je nástroj plně funkční a přehledný. Ukázky jednotlivých výstupů z testování základních funkcí autor využil, jako ilustrativní obrázky předešlým kapitolám: 7.1, 7.2 a 7.2.3.

7.4.2 Robustnost nástroje

Robustnost nástroje autor otestoval pomocí nestandardních vstupů, které by uživatel mohl přehlédnout. Hlavní část, která není tolik jednoznačná vstupním formátem je zadávání intervalů nákladů způsobených poruchou objektu. Tyto vstupy autor ošetřil skupinou upozorňovacích hlášek, které se při špatném vstupu vypíší vedle buňky pro vstupní data.

Nástroj dokáže rozpoznat některé vstupy, které by znamenaly špatný výpočet. Těmi jsou například: Kontrola počátku prvního intervalu od 1, Nenávaznost intervalů, kontrola vstupu pouze kladných čísel a kontrola, zda konec intervalu není menší, než jeho začátek. Pokud uživatel vyplní všechny vstupy správně, nástroj validitu vstupu potvrdí komentářem *Validní*.

- Kontrola počátku prvního intervalu od 1 - [✗ OD musí být 1]
- Nenávaznost intervalů - [✗ Intervaly nenavazují]
- Kontrola vstupu pouze kladných čísel - [✗ Záporné číslo]
- Kontrola, zda konec intervalu není menší, než jeho počátek - [✗ $DO \leq OD$]
- Správný formát vstupu - [✓ Validní]

Kontrola vstupů	Intervaly	
-	Od	Do
✗ OD musí být 1	0	9
✗ $DO \leq OD$	10	8
✗ Intervaly nenavazují	15	32
✓ Validní	33	40
✗ Záporné číslo	-3	50

Obrázek 7.5: Demonstrace kontroly vstupů u každého z intervalů.

8 Citlivostní analýza

Cílem této analýzy bylo zjistit, které vstupní parametry ovlivňují výslednou hodnotu celkových nákladů nejvíce a pokud to bude možné, tak je kvantifikovat.

Při zadávání projektu a následném vyhodnocování nabídek je velmi důležité znát, které vstupní parametry ovlivňují výslednou cenu nejvíce.

8.1 Identifikace kritických parametrů

Kritické parametry jsou takové, které se typicky platí každým rokem, po celou dobu předpokládaného života objektu. Těmito jsou náklady na údržbu a provoz a celkové náklady z poruch. Dále by mezi kritické parametry šlo zahrnout i mezní pořizovací náklady, které (pokud jsou dostatečně vysoké) mohou přebít ty každoroční.

8.1.1 Kvantifikace citlivosti kritických parametrů

Zjištění a následnou kvantifikaci kritických parametrů, autor vypočítal na 3 scénářích: 1) Nejvýhodnější scénář, 2) Nejméně výhodný scénář a 3) Průměrný scénář.

Typ nákladů	Nejvýhodnější scénář	Nejméně výhodný scénář	Průměrný scénář
Celkové náklady poruch	30,4 mil. Kč	334,9 mil. Kč (+1000%)	187,9 mil. Kč (+550%)
Celkové náklady údržby	55,6 mil. Kč	55,6 mil. Kč (+0%)	55,6 mil. Kč (+0%)
Pořizovací náklady	240 mil. Kč	181 mil. Kč (-24,6%)	195 mil. Kč (-18,8%)
Celkové náklady	326,1 mil. Kč	571,6 mil. Kč (+75,3%)	448,6 mil. Kč (+37,6%)

Tabulka 8.1: Tabulka demonstrující výpočet škálovacího koeficientu z referenčního výpočtu.

Z této analýzy lze vyzorovat, že mezi nejvýhodnějším a nejméně výhodným scénářem je rozdíl 1000%, což lze interpretovat, jako 11-násobné zvýšení v celkových

nákladů způsobených poruchou za celou životnost objektu. Na výsledné částce celkových nákladů se tato změna odrazí ale pouze jako 75,3% nárůst. To je způsobeno tím, že nejvýhodnější scénář má 60ti násobně vyšší počáteční náklady.

Celkové náklady na provoz a údržbu jsou zde v jedné fixní sazbě, jelikož v rané fázi plánování je nepravděpodobné, že tuto hodnotu bude uživatel nástroje znát, proto jako její substituci lze pro všechny nabídky zadat stejnou hodnotu.

8.2 Intervaly nákladů způsobených poruchou objektu

Při testování nástroje (viz. 7.4) autor odhalil, že největší efekt na výslednou hodnotu celkových nákladů má cena celkových nákladů způsobených poruchami. Stejně jako výše nákladů na údržbu a provoz objektu, jedná se hodnotu, která reprezentuje náklady na každý rok životnosti objektu. To znamená, že tato výsledná suma celkových nákladů způsobených poruchami objektu, bude několik desítek-krát větší, než její pravidelná roční hodnota. Do výpočtu této sumy v nástroji autor zapracoval i mechanismus, uvažující inflaci 2% za rok.

Tato funkce umožňuje uživateli nástroje brát v úvahu fakt, že může být výhodnější zaplatit vyšší částku pro lepší pohotovost objektu, než následně platit více po celou dobu předpokládané životnosti objektu na údržbě a provozních ztrátách.

Samotnou citlivostní analýzou se autor snažil zjistit, zda větší vliv na výslednou cenu nákladů z poruch objektu mají délky intervalů, náklady na každý další den anebo jejich kombinace. Proto se rozhodl tuto analýzu rozdělit do několika případů, kde postupně kombinoval velikosti a počet intervalů a jejich náklady.

8.2.1 Testovací scénáře pohotovostí

Pro zjištění dopadu na celkovou výši nákladů u jednotlivých scénářů, se autor rozhodl vytvořit 12 fiktivních testovacích scénářů s pohotovostí s krokem 0.02 v rozsahu od 0.76 do 0.98. Na tomto úměrném rozsahu různých pohotovostí bylo možné pozorovat způsob změny jednotlivých vstupních parametrů a na jaké výše pohotovostí měli největší vliv.

8.2.2 Skupina konstantní sazby

K1: Konstantní sazba + stejné délky - Pro tento scénář autor vybral konstantní sazbu 70000 Kč/den v poruše a délku intervalu 5 dní.

Průměrná hodnota celkových nákladů = 712 285 439,51 Kč.

K2: Konstantní sazba + prodlužující se intervaly - Konstantní sazba byla stejných 70000 Kč/den v poruše a intervaly se postupně dvakrát prodlužovaly z počátečního intervalu o délce 5 dní.

Průměrná hodnota celkových nákladů = 712 285 439,51 Kč

8.2.3 Skupina růstové sazby

R1: Růstová sazba + stejné délky - Tento scénář se vyznačuje růstovou sazbou od počátečních 30000 Kč až do 150000 Kč za den v poruše. Délka intervalu měla konstantní délku 5 dní.

Průměrná hodnota celkových nákladů = 521 098 182,43 Kč

R2: Růstová sazba + prodlužující se intervaly - Tempo růstu bylo stejné jako u R1, intervaly se postupně zdvojnásobovaly v délce z prvního intervalu o délce 5 dní.

Průměrná hodnota celkových nákladů = 497 937 730,86 Kč

8.2.4 Skupina degresivní sazby

D1: Degresivní sazba + stejné délky - V tomto scénáři sazba postupně klesala z 120000 Kč na 25000 Kč. Délky intervalů byly konstantní s délkou 5 dní.

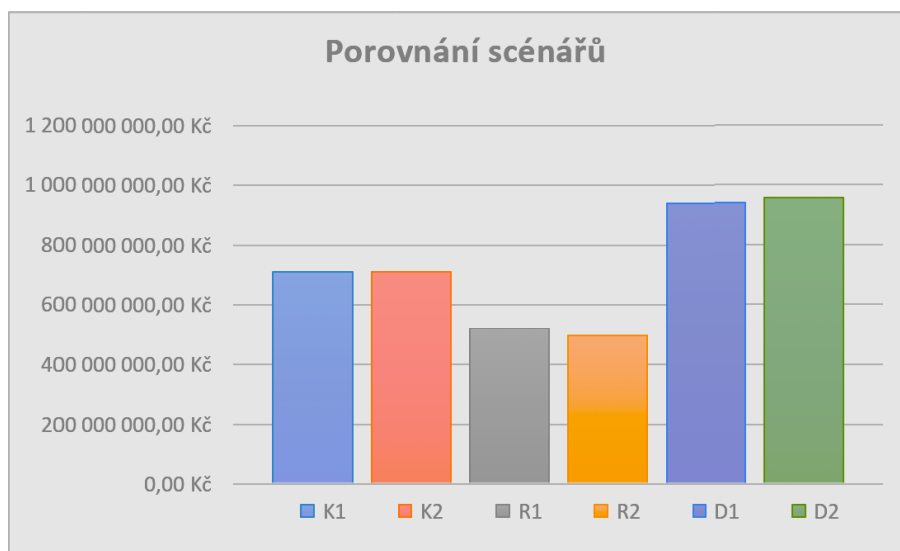
Průměrná hodnota celkových nákladů = 941 392 259,46 Kč

D2: Degresivní sazba + prodlužující se intervaly - Tempo klesání sazby bylo stejné jako u D1, intervaly se dvakrát prodlužovaly z původních 5ti dní.

Průměrná hodnota celkových nákladů = 958 422 003,26 Kč

8.2.5 Výsledky citlivostní analýzy nákladů z poruchy

Nejvýhodnější řešení vychází dle tohoto testování skupina R2, která se vyznačuje růstovou sazbou + prodlužujícími se intervaly. Naopak nejhorší výsledek měly jasně scénáře s degresivní sazbou nákladů, které měly téměř 2x větší náklady, než scénáře s regresivní sazbou.



Obrázek 8.1: Graf výsledků porovnávání scénářů různých typů vstupů intervalů nákladů z poruchy objektu.

Další zajímavý výsledek z této analýzy je fakt, že největší vliv na výslednou hodnotu celkových nákladů z poruchy objektu měla hodnota sazba v prvních intervalech. To znamená, že výsledná výše nákladů závisí hlavně na počtu krátkých poruch (trvajících maximálně 3 dny), než na těch závažnějších.

9 Příklad aplikace nástroje

V této kapitole autor nástroj otestoval na reálném zadání, které obdržel přímo od Povodí Vltavy s.p. Toto zadání se skládá ze skupiny hodnot, mezi nimiž například jsou: náklady na údržbu a provoz objektu a několik scénářů nákladů způsobených poruchou objektu.

Tyto hodnoty následně autor vložil do nástroje, který následně vyhodnotil, jaký z dodavatelů je ten nejvhodnější.

9.1 Aplikace na konkrétním scénáři

Jelikož autor dokumentu neobdržel všechna potřebná data pro výpočet výsledných nákladů, některé tyto hodnoty odhadl nebo vyhledal. Pro shrnutí konkrétního scénáře, jedná se o výpočet optimální pohotovosti pro zvedací most v Měřejovicích z několika nabídek různých potenciálních dodavatelů.

9.1.1 Zadaná vstupní data

Mezi definovanými vstupními daty od zadavatele, autor obdržel 3 varianty možných škod způsobených nefunkčností zvedacího mostu. Ostatní definované vstupní hodnoty byly udány pouze v jedné variantě. Autor se proto rozhodl aplikaci rozdělit na 3 varianty, na kterém zjistí, která varianta je nejvíce a nejméně výhodná.

	VAR 1	VAR 2	VAR 3
	Kč/den	Kč/den	Kč/den
1.–5. den	10 000	10 000	10 000
6.–10. den	450 000	300 000	150 000
11. a více	400 000	250 000	100 000

Tabulka 9.1: Výše nákladů za poruchu dle variant

Další vstupní hodnoty nákladů byly zvoleny ve výši **413 669 Kč/rok**. V této části jsou hrazeny roční náklady na **provoz**, **údržbu** a **revizi** objektu. Jedná se o částku, převzatou z podobného zvedacího mostu, který má podobnou strukturu a vlastnosti.

9.1.2 Odhadnutá vstupní data

Ostatní parametry poruch, jakými jsou průměrné délky a jejich roční četnost výskytů, autor odhadl na základě testování při vytváření samotného nástroje. Tyto parametry jsou vyobrazeny v tabulce 7.4.

Předpokládaná délka životnosti objektu byla také odhadnuta autorem na **50 let**.

9.1.3 Virtuální nabídky dodavatelů

Pro demonstraci autor vytvořil několik virtuálních nabídek s vlastní cenou a mírou pohotovosti. Celkem tedy vytvořil 6 různých nabídek s různými vlastnostmi od nevýhodných po ty výhodné.

Název	Pohotovost	Požizovací náklady	Náklady na údržbu a provoz
Dodavatel 1	0,82	188 000 000,00 Kč	413 699,00 Kč
Dodavatel 2	0,9	212 000 000,00 Kč	413 699,00 Kč
Dodavatel 3	0,9	218 000 000,00 Kč	413 699,00 Kč
Dodavatel 4	0,95	220 000 000,00 Kč	413 699,00 Kč
Dodavatel 5	0,97	230 000 000,00 Kč	413 699,00 Kč
Dodavatel 6	0,98	320 000 000,00 Kč	413 699,00 Kč

Obrázek 9.1: Tabulka virtuálních nabídek od potenciálních dodavatelů a jejich parametry.

Takto stanovenými hodnotami pohotovostí a jejich mezních pořizovacích cen se autor dokáže přiblížit reálnému scénáři, pro který byl nástroj navržen. Dle výpočtů popsaných v kapitole [Metodologie výpočtů](#), nástroj následně vypočítal výsledné hodnoty celkových nákladů investice po celou dobu životnosti objektu, od jeho vybudování až po jeho vyřazení.

9.1.4 Výsledky jednotlivých variant aplikace

Varianta 1 nákladů za poruchu objektu (VAR 1) vyšla nejméně výhodněji ze všech tří ostatních variant. Jak autor zjistil v kapitole [Citlivostní analýza](#), tak zvýšené náklady v brzkých intervalech (do 10ti dní) mají největší vliv na výsledné celkové náklady objektu.

Název	Pohotovost	Celkové náklady investice
Dodavatel 1	0,82	1 432 144 162,55 Kč
Dodavatel 2	0,9	933 938 175,22 Kč
Dodavatel 3	0,9	939 938 175,22 Kč
Dodavatel 4	0,95	617 810 321,02 Kč
Dodavatel 5	0,97	483 753 496,93 Kč
Dodavatel 6	0,98	519 732 187,89 Kč

Obrázek 9.2: Výsledné hodnoty celkových nákladů Varianty 1.

Varianta 2 nákladů za poruchu objektu (VAR 2) vyšla ze trojice variant jako ta středně dobrá. Nabízela velké zlevnění nabídky s nejmenší pohotovostí a to až o 25,4% levněji, než varianta 1.

Název	Pohotovost	Celkové náklady investice
Dodavatel 1	0,82	1 038 072 929,28 Kč
Dodavatel 2	0,9	713 019 453,54 Kč
Dodavatel 3	0,9	719 019 453,54 Kč
Dodavatel 4	0,95	504 365 572,05 Kč
Dodavatel 5	0,97	418 074 958,05 Kč
Dodavatel 6	0,98	471 965 977,80 Kč

Obrázek 9.3: Výsledné hodnoty celkových nákladů Varianty 2.

Varianta 3 vyšla ze všech zadaných scénářů nejlépe, jelikož její náklady za poruchu objektu jsou v druhém intervalu dvojnásobně nižší, než druhá varianta a až třikrát nižší, než v variantě první.

Název	Pohotovost	Celkové náklady investice
Dodavatel 1	0,82	644 001 696,01 Kč
Dodavatel 2	0,9	492 100 731,86 Kč
Dodavatel 3	0,9	498 100 731,86 Kč
Dodavatel 4	0,95	390 920 823,07 Kč
Dodavatel 5	0,97	352 396 419,17 Kč
Dodavatel 6	0,98	424 199 767,71 Kč

Obrázek 9.4: Výsledné hodnoty celkových nákladů Varianty 3.

V této poslední variantě lze pozorovat zlevnění nejméně výhodné nabídky až o 50,8%. Na druhé straně jako nejvýhodnější nabídku nástroj určil vždy

9.1.5 Shrnutí výsledků aplikace na zadání Měřejovického mostu

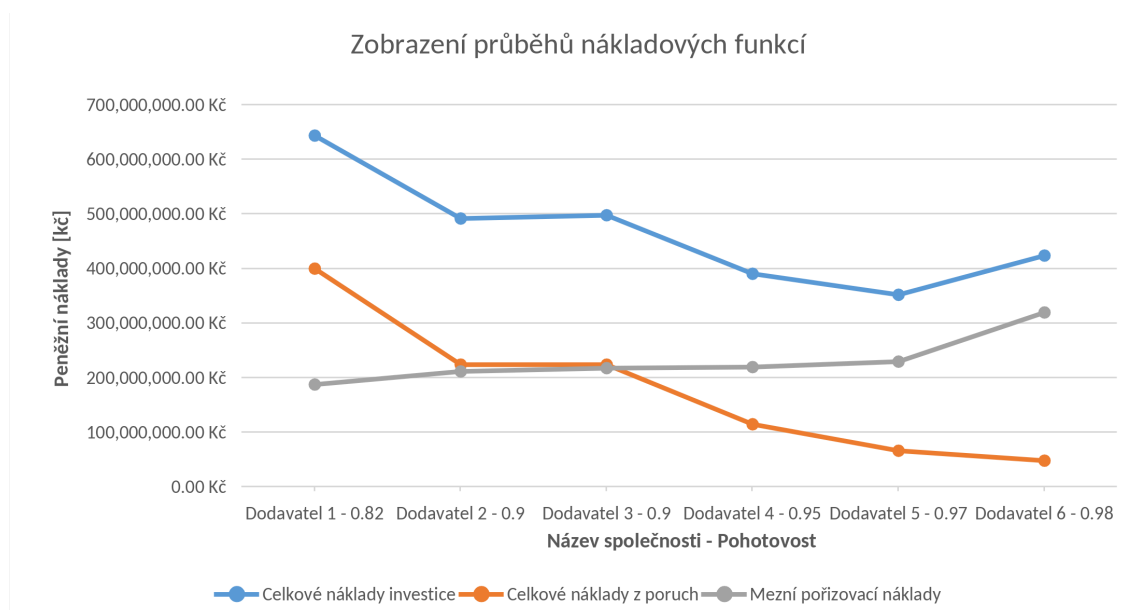
Z aplikace na reálných nebo expertně odhadnutých datech lze pomocí nástroje určit, že nejvýhodnějším scénářem je zpravidla ten, který má vyšší úroveň pohotovosti a není za příliš vysokou cenu. Z výsledků aplikace lze vypožorovat, že větší investice klidně i vyšších desítek milionů dokáže z dlouhodobého hlediska být klidně i několika násobně výhodnější pro provozovatele objektu a jeho uživatele.

9.2 Stanovení mezní úrovně nepohotovosti systému

V této kapitole autor na základě hodnot vyplývajících z nástroje stanovil maximální přijatelnou úroveň nepohotovosti. Tato hodnota vyjadřuje maximální limit počtu poruch za rok, nad který objekt začne být značně prodělečný.

Hodnoty, na kterých toto stanovení stojí byly autorem odhadnuty z důvodu, že budou vloženy až při reálném využívání nástroje a budou u každého projektu různé. Autor proto v kapitole [Citlivostní analýza](#) identifikoval a kvantifikoval vstupní hodnoty, které nejvíce přispívají k výsledné výši celkových nákladů objektu.

V scénářích nabídek autor zjistil, že nejvýhodnější scénáře jsou takové s pohotovostí vyšší, než 97 %. To lze interpretovat, jako méně než 11 dní celkově, kdy je objekt v poruše za dobu jednoho roku. Pro stručné shrnutí, jednalo se o nabídku s pořizovacími náklady 230 mil. Kč (viz. 9.1).



Obrázek 9.5: Grafické porovnání jednotlivých nabídek scénářů z nástroje.

Po hlubším zkoumání autor zjistil, že s touto výší pořizovacích nákladů je tato nabídka stále nejvýhodnější až do pohotovosti 95,4% s zachováním stejné pořizovací ceny. To znamená maximální výši nepohotovosti 4,6%.

9.3 Stanovení požadavků na spolehlivostní a bezpečnostní ukazatele

Tyto požadavky autor stanovil na základě matice kritičnosti, jako kvalitativní metody. Následně výsledky této analýzy kvantifikoval v nástroji pomocí vstupních dat v tabulce Parametry poruch (viz. [Tabulka pro zadávání parametrů poruch](#)). Stanovená míra požadavků na spolehlivost se skládá z pravděpodobnosti nastoupení poruchy a závažnosti jejího dopadu. Poruchy, které jsou již nad rámec přijatelnosti jsou v matici rizik označeny jako: Nežádoucí, Kritické a Nepřípustné.

Z toho vyplývá, že spolehlivostní požadavky na systém by měly být stanoveny tak, aby nepřesáhly tyto hodnoty. Pokud uživatelé tyto hodnoty nebudou vyhovovat, nástroj je postaven tak, že je může dle svého uvážení změnit. V této kapitole proto autor srovnal tyto požadavky do formátu: **Průměrná délka poruchy [dny] - Četnost výskytu poruch [za rok]**.

- 1-3 dny - >20x za rok

- 3-6 dní - 5x za rok
- 6-15 dní - 0,8x za rok
- 15-30 dní - 0,2x za rok
- 30 a více dní - 0,02x za rok

Výstupy z nástroje a analýz vypracovaných výše v tomto dokumentu jsou hlavně ekonomicky podepřené. Spolehlivostní ukazatele jednotlivých technologických řešení již dodavatel určí sám na základě technologických možností aktuálního projektu.

Pro minimalizaci MTTR (času potřebného pro uvedení objektu opět do provozu) je nutné identifikovat kritické komponenty, například pomocí FMECA analýzy. Tyto komponenty by ideálně měly být připravené, jako náhradní kusy pro rychlou výměnu. Pokud výpadek těchto komponent má velký negativní dopad, je vhodné, aby dodavatel zvážil instalaci redundantních prvků rovnou do systému.

Závěr

Cílem tohoto projektu bylo stanovit spolehlivostní požadavky pro zvedací most. Toho autor dosáhl vytvoření vlastního nástroje, který dokáže porovnávat několik různých nabídek potenciálních dodavatelů. Tento nástroj uživatelé využijí ve fázi plánování projektu, kdy je nutný prvotní odhad, které nabídky budou nákladově ve výsledku ty nejvýhodnější. Výsledný nástroj rozpočítá jednotlivé náklady, ze kterých uživatel snadno identifikuje ty náklady, které nejvíce přispívají k výsledné ceně projektu.

Mimo nástroj, autor vypracoval rámcovou spolehlivostní a rizikovou analýzu. Za pomoci standardních analytických metod autor dokázal identifikovat několik kritických komponent systému, kterým následně navrhl spolehlivostní opatření. Následně autor odhadl ekonomický vývoj hladiny cen stavebních projektů, který implementoval do nástroje pro přesnější časové zhodnocení nákladů.

Dále autor rozčlenil a kvantifikoval různé typy poruch, na základě kterých nástroj rozpočítává náklady jimi způsobenými. V nástroji jsou tyto a další výše zmíněné vstupy zcela měnitelné, tudíž je uživatel může přizpůsobit i jiným dalším projektům.

V průběhu vytváření tohoto projektu autor narazil na několik překážek. Hlavní překážkou byla jednoznačně omezenost dostupnosti spolehlivostních dat jednotlivých technologických řešení. Kvůli tomu autor provedl odhad na základě veřejně dostupných dat, se kterými nadále pracoval. Další překážkou byla autorova volba vytvořit nástroj v tabulkovém procesoru, jako je například MS Excel a podobné. V tomto případě autor musel podstoupit kompromis pro dosažení kompatibility nástroje s většinou pracovních počítačů za cenu omezené základny dostupných funkcí nástroje.

Na základě testování nástroje na reálných datech z projektu Miřejovického zvedacího mostu lze konstatovat, že řešení je funkční a připravené pro praktické nasazení. V rámci testování na různých scénářích autor ověřil věrohodnost a použitelnost výsledků.

Jako směr dalšího řešení tohoto projektu se jeví vytvoření samostatné aplikace, která by nahradila stávající řešení v tabulkovém procesoru. Toto řešení by pomohlo implementovat složitější funkce, které například vyžadují skriptování.

Tato práce představila rámcovou spolehlivostní a rizikovou analýzu navrženého konceptu řešení zvedacího zařízení. Testování a citlivostní analýza identifikovala a kvantifikovala klíčové nákladové faktory. Navrhované řešení slouží jako silný základ pro rozhodování i v případě omezení malým množstvím vstupních dat.

Použitá literatura

- [1] (ERÚ), Energetický regulační úřad. *Zpráva o dosažené úrovni nepřetržitosti přenosu nebo distribuce elektřiny za rok 2022* [<https://eru.gov.cz/sites/default/files/obsah/prilohy/zprava-o-dosazene-urovni-nepretrzitosti-prenosu-nebo-distribuce-elektriny-za-rok-2022.pdf>]. 2023. Accessed April 2025.
- [2] AG, Siemens. *SIMOTICS Electric Motors - Technical Data* [<https://new.siemens.com/global/en/products/drives/electric-motors.html>]. 2022. Accessed April 2025.
- [3] AQUATIS A.S. a VALBEK, SPOL. S R. O. *Úprava ohlaví PK Hořín – PS01.1 Ovládací technologie* [Interní projektová dokumentace, AQUATIS a.s., Botanická 834/56, 602 00 Brno-střed a Valbek, spol. s r. o., Vaňurova 505/17, 460 02 Liberec 3]. 2021. Nepublikovaný dokument, dostupný v archivu projektové dokumentace.
- [4] COMMISSION, International Electrotechnical. *IEC 60050-192:2015 - International Electrotechnical Vocabulary – Part 192: Dependability*. 2015. Dostupné také z: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=192>. Accessed: 2025-01-10.
- [5] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Indexy cen výrobců - únor 2025: Ceny průmyslových výrobců po dvanácti měsících meziročně klesly* [<https://www.czso.cz/csu/czso/indexy-cen-vyrobcu-unor-2025>]. 2025. Kód: 011047-25. Datum vydání: 17. 03. 2025.
- [6] DĚDEK, Ondřej. *Vltava, VD Měřejovice – modernizace mostu, SO202 – Zvedané pole*. Praha, 2023. Technická zpráva. PONTEX spol. s r. o., Bezová 1658, 147 00 Praha 4. Interní dokumentace, neveřejně publikováno.
- [7] DUFEK, Zdeněk et al. *Komplexní vyhodnocení ekonomické efektivnosti veřejných investic do rozvoje infrastruktury vodních cest vhodných pro nákladní vnitrozemskou dopravu v ČR*. Brno, 2015. Interní dokument. Fakulta stavební VUT v Brně, AdMaS. 154 stran. Neveřejně publikováno.
- [8] ELECTRIC, Schneider. *Modicon M340 PLC - Reliability Data* [<https://www.se.com/ww/en/product-range/61905-modicon-m340/>]. 2020. Accessed April 2025.

- [9] GMBH, HYDAC Technology. *Hydraulic Cylinders - Cylinders* [<https://www.hydac.com/shop/en/cylinders/hydraulic-cylinders>]. 2025. Accessed April 2025.
- [10] GMBH, ifm electronic. *Magnetic Sensors* [https://www.ifm.com/us/en/category/200_010_040]. 2025. Accessed April 2025.
- [11] GMBH, PULS. *UB10.241 - DC-UPS with 10 A Output Current* [<https://www.pulspower.com/products/details/ub10-241>]. 2021. Accessed April 2025.
- [12] INC., Caterpillar. *Diesel Generator Set - Technical Specifications* [https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets.html]. 2021. Accessed April 2025.
- [13] KONZULTANT PROJEKTU POVODÍ VLTAVY S.P. *Osobní komunikace – údaje o nákladech na provoz a údržbu*. 2025. Informace zaslaná e-mailem. Neveřejný zdroj.
- [14] NDCON S.R.O. *Podklad pro zpracování CBA projektů na vodní infrastruktuře. Model je založen na analýze výnosů a nákladů a je plně v souladu s metodikou současné Evropské komise o CBA*. 2013. Interní dokument. Neveřejně publikováno.
- [15] ŘEDITELSTVÍ VODNÍCH CEST ČR. *Plán modernizace plavebních komor na Vltavě. Časopis pro ekologické, ekonomické a technické aspekty vodní dopravy a vodních cest v ČR, Evropě a na jiných kontinentech*. 2020.
- [16] SUDOP PRAHA A.S. *Aktualizace hodnocení ekonomické efektivity rekreační plavby na labskovltavské vodní cestě. Část: Marketingová analýza, ekonomické hodnocení*. Praha, 2020. Vyhledávací studie. Objednatel: Ředitelství vodních cest ČR. Interní dokumentace, neveřejně publikováno.
- [17] VALBEK, SPOL. S R. O. *Dokumentace skutečného provedení stavby – Hydraulické schéma – levá, hydraulický systém* [Interní dokumentace, Valbek, spol. s r. o., Vaňurova 505/17, 460 02 Liberec 3]. 2024. Nepublikovaný interní materiál, dostupný v archivu projektové dokumentace.

A Přílohy

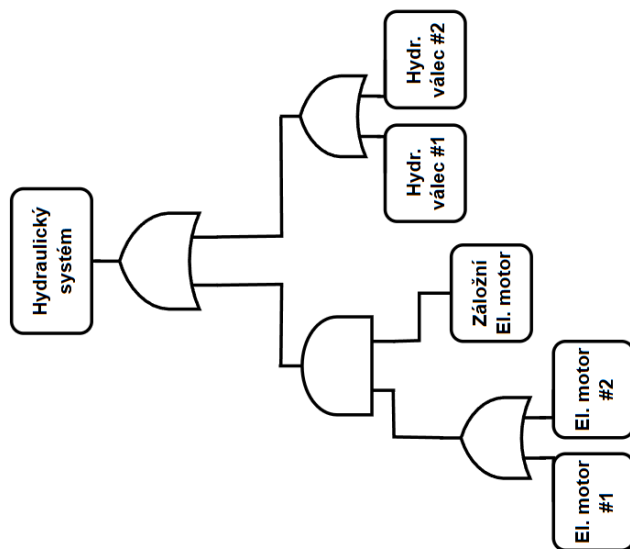
A.1 Velké tabulky a obrázky

HAZOP - Řídící systém					
Komponenta	Parametr	Vodící slovo	Příčina	Důsledek	Opatření
Senzory	Data	Částečný	Částečné selhání	Omezená data pro SW	Redundance senzorů
Senzory	Data	Jiný, než	Poškozené čidlo / SW	Špatné vyhodnocení SW	Samotesty
Senzory	Data	Žádný	Celkové selhání / Chyba řídicí jednotky	Nemožnost ovládání	Redundance senzorů
PLC	Odezva	Vyšší	Zahlcení systému	Pozdní reakce	Optimalizace PLC logiky
PLC	Ovládací logika	Jiný, než	Chyba v programu	Nefunkční systém	Testování scénářů

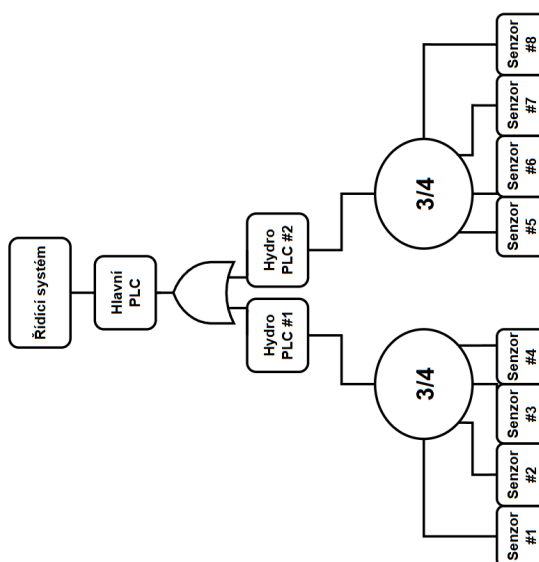
Obrázek A.1: HAZOP analýza řídicího sub-systému.

HAZOP - Zdroj elektřiny					
Komponenta	Parametr	Vodící slovo	Příčina	Důsledek	Opatření
Přípojka ČEZ	Napětí	Žádný	Výpadek veřejné sítě	Bez napájení	Redundance přípojky
Agregát	Napětí	Žádný	Výpadek agregátu	Bez napájení	Pravidelné zkoušky agregátu
Agregát	Napětí	Nižší	Nedostatečný výkon	Nedostatek výkonu pro čerpadla	Poškozený agregát
UPS	Napětí	Nižší	Degradované bateriové články	Nedostatek výkonu pro čerpadla	Pravidelné výměny baterií
UPS	Napětí	Žádný	Přerušený obvod	Bez napájení	Pravidelné kontroly kontaktů
UPS	Napětí	Vyšší	Poškozený regulátor napětí	Přetěžování akčních členů	Údržba regulátorů

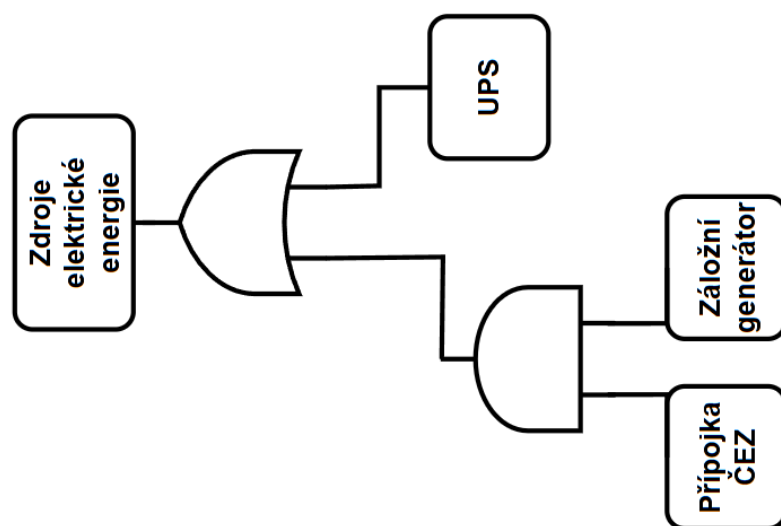
Obrázek A.2: HAZOP analýza zdroje elektrické energie.



Obrázek A.3: FTA analýza hydraulického systému.



Obrázek A.4: FTA analýza řídicího systému.



Obrázek A.5: FTA analýza zdroje elektrické energie.