

# **Optimalizace kapacity bunkru spalovny odpadu s ohledem na rizika vynucených odstávek provozu**

Jan Zdražil

---

Bakalářská práce  
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jan Zdražil
Osobní číslo:	A18545
Studijní program:	B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor:	Bezpečnostní technologie, systémy a management
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Optimalizace kapacity bunkru spalovny odpadu s ohledem na rizika vynucených odstávek provozu
Téma práce anglicky:	The Optimisation of Waste Bunker Capacity Regarding Incinerator Shutdown Risks

### Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s pojmy z oblasti matematické optimalizace, zejména se zaměřením na optimalizaci skladovacích zásob a tzv. úlohu kolportéra novin.
2. Zformulujte a zanalyzujte úlohu pro optimalizaci velikosti bunkru na odpad.
3. Do sestavného modelu zahrňte tzv. rizikové scénáře spojené s plánovanými odstávkami provozu. Důležitým aspektem, který bude práce obsahovat je tzv. ekonomická udržitelnost.
4. Provedte důkladnou diskuzi dosažených výsledků. Popište omezení a limity zvoleného přístupu a určete směry pro případný další výzkum.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. GHIANI, Gianpaolo, Gilbert LAPORTE a Roberto MUSMANNO. *Introduction to logistics systems planning and control*. Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, c2004. ISBN 0-470-84917-7.
2. STEHLÍK, Petr. *Up-to-Date Waste-to-Energy Approach: From Idea to Industrial Application*. Imprint: Springer, 2016. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. ISBN 978-3-319-15467-1.
3. ŠOMPLÁK, Radovan. *Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů*. Brno, 2016. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství.
4. ŠOMPLÁK, Radovan. *Využití metod stochastického programování pro hodnocení investic v energetických zdrojích*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dušan Hrabec, PhD.**  
Ústav matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2021**

**doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.**  
děkan



**Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2021

## **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

## **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 29.4.2021

Jan Zdražil v.r.  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá optimalizací velikosti odpadního bunkru, s ohledem na vynucené odstávky provozu v zařízení pro energetické využití odpadu. V úvodu práce je popsán současný stav odpadového hospodářství v České republice, a problematika energetického využití komunálního odpadu. Následující kapitola objasňuje proces zpracování odpadu v zařízení pro energetické využití odpadu a klade důraz na důležitost odpadního bunkru. Jádrem práce, je tvorba matematických modelů zaměřených na nalezení optimální velikosti odpadního bunkru a potřebné ceny na jeho výstavbu. Matematické modely jsou inspirovány optimalizační úlohou kolportéra novin. Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků, jsou na závěrečný model aplikována data ze spalovny Termizo a.s. a samotný program je tvořen v softwaru GAMS. Závěrečná kapitola je věnována dopadu optimalizace na bezpečnost aktiv zařízení pro energetické využití odpadu, které jsou spjata s odpadním bunkrem.

Klíčová slova: Odpadní bunkr, Zařízení pro energetické využití odpadu, úloha kolportéra novin, optimalizace, stochastické programování, bezpečnost

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis deals with the optimization of the size of the waste bunker regarding forced outages in the waste-to-energy plant. The introduction presents the current state of waste management in the Czech Republic and the energy use of municipal waste. The following chapter clarifies the waste treatment process in waste-to-energy plant and emphasizes the importance of waste bunker. The core of the work is the creation of mathematical models aimed at preparing the optimal size of waste bunker and the price for its construction. Mathematical models are inspired by the optimization task of a newsvendor problem. To obtain the most accurate results, data from the Termizo a.s. incinerator are applied to the final model. The program itself is created in GAMS software. The final chapter is devoted to the impact of optimization on the security of waste-to-energy plant assets, which are related to waste bunker.

Keywords: Waste bunker, Waste-to-energy plant, Newsvendor Problem, optimization, security, stochastic programming

Děkuji panu Ing. Dušanovi Hrabcovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce a cenné rady. Dále bych rád poděkoval Ing. Radovanovi Šomplákovi, Ph.D. za konzultace a ochotu. Dík také patří firmám Termizo a.s. a IP Systém a.s. za poskytnutá data.

Táto práce vznikla za podpory projektu "Nové přístupy operačního výzkumu pro udržitelnost v odpadovém hospodářství" č. GA 20-00091Y financovaného Grantovou agenturou České republiky.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>8</b>
<b>1 KOMUNÁLNÍ ODPAD</b> .....	<b>9</b>
1.1 DĚLENÍ ODPADU .....	9
1.2 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU .....	10
<b>2 ZAŘÍZENÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU</b> .....	<b>12</b>
2.1 POPIS ZAŘÍZENÍ PRO ENERGETICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADU .....	13
2.1.1 Základní komponenty ZEVO.....	13
2.1.2 Technologický proces zpracování odpadu.....	13
2.1.3 Porovnání kapacit odpadních bunkrů v ČR .....	14
<b>3 ILUSTRACNÍ ÚLOHA PRO OPTIMALIZACI SKLADOVACÍCH ZÁSOB</b> .....	<b>15</b>
3.1 HISTORIE ÚLOHY KOLPORTÉRA NOVIN.....	15
3.2 UKÁZKA ZÁKLADNÍHO MODELU .....	16
3.3 APLIKACE NP V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ .....	16
<b>4 ANALÝZA MOŽNÉHO VÝSKYTU A VLIVU DAT</b> .....	<b>18</b>
4.1 HISTORIE METODY FMEA .....	18
4.2 VÝHODY METODY FMEA.....	18
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>19</b>
<b>5 VSTUPNÍ DATA</b> .....	<b>20</b>
5.1 NÁVOZ A SPALOVÁNÍ ODPADU V ZEVO .....	20
5.2 BILANCE ODPADU .....	21
5.3 VYNUCENÉ Odstávky v ZEVO.....	22
5.4 ZAPLNĚNOST ODPADNÍHO BUNKRU.....	23
<b>6 OPTIMALIZACE VELIKOSTI ODPADNÍHO BUNKRU</b> .....	<b>24</b>
6.1 FORMULACE MODELU 1 .....	25
6.1.1 Hledání optimálního množství.....	25
6.1.2 Numerické výsledky pro model 1 .....	26
6.1.3 Vyhodnocení modelu 1 .....	27
6.2 FORMULACE MODELU 2 .....	27
6.2.1 Hledání optimálního množství.....	28
6.2.2 Numerické výsledky pro model 2.....	29
6.2.3 Vyhodnocení modelu 2.....	29
<b>7 APLIKACE SCÉNÁŘOVÉHO ŘEŠENÍ</b> .....	<b>30</b>
7.1 WAIT AND SEE PŘÍSTUP .....	30



7.2	HERE AND NOW PŘÍSTUP .....	31
7.3	OPTIMALIZACE ODPADNÍHO BUNKRU .....	31
7.4	NUMERICKÉ VÝSLEDKY SCÉNÁŘOVÉHO PŘÍSTUPU .....	32
7.5	VYHODNOCENÍ SCÉNÁŘOVÉHO PŘÍSTUPU .....	33
<b>8</b>	<b>DOPAD OPTIMALIZACE NA BEZPEČNOST .....</b>	<b>34</b>
8.1	IDENTIFIKACE A DEFINICE AKTIV .....	34
8.2	DEFINICE ZRANITELNOSTI.....	34
8.3	IDENTIFIKACE HROZEB.....	34
8.4	HODNOCENÍ RIZIK.....	35
	8.4.1 Hodnocení výskytu .....	35
	8.4.2 Hodnocení významu .....	36
	8.4.3 Hodnocení kritičnosti.....	36
8.5	APLIKACE METODY FMEA .....	37
8.6	ZHODNOCENÍ DOPADU OPTIMALIZACE NA BEZPEČNOST .....	39
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>40</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>43</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>46</b>

## ÚVOD

Odpadové hospodářství (OH) je pojem shrnující široké spektrum aktivit vedoucích primárně k omezení nadměrné tvorby odpadu, jeho recyklaci anebo energetickému využití. Z právního hlediska, bylo v České republice OH zavedeno v roce 1991 a to ve formě prvního zákona o odpadech [1]. Od té doby, a zejména po vstupu ČR do Evropské unie, prošlo OH rapidním vývojem. Hlavní problematikou zpracování komunálního odpadu na území ČR v dnešní době ovšem stále zůstává nedostatečné množství aktivních zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO). Ministerstvo životního prostředí uvádí, že pouhých 12 % komunálního odpadu je ročně energeticky využito [1]. Hromadění odpadu se tak historicky řešilo zakládáním skládek. Tento přístup se ovšem v poslední době jeví jako neudržitelný, a to zejména kvůli stále se zvyšující produkci odpadu, rostoucí ceně za uskladněné množství a negativním dopadům na životní prostředí.

Správná volba jednotlivých komponent ZEVO je podmínkou zásadního zefektivnění procesu energetického využití odpadu. Velikost odpadního bunkru (OB), například, tvoří značnou část investice při stavbě nebo rekonstrukci ZEVO. Optimalizace velikosti OB tak reprezentuje výzvu, jejíž řešení může vést k redukci finančních ztrát a snížení možných hrozeb pro určitá aktiva ZEVO.

Bakalářská práce je věnována řešení problematiky vyhodnocení strategického investování do výstavby OB s ohledem na vynucené odstávky provozu. Hlavním cílem je nalézt ekonomicky vhodné řešení pro dopředu neznámý vývoj odpadového hospodářství a sestavení obecného matematického modelu pro výpočet kapacity OB pomocí úlohy kolportéra novin. Dalším cílem práce je porovnání a vyhodnocení bezpečnostního stavu ZEVO před a po optimalizaci OB.

První kapitola teoretické části je zaměřena na strukturní dělení komunálního odpadu (KO) a jeho možné energetické využití. Následně je v práci důkladně popsán a graficky znázorněn technologický proces ZEVO. Třetí kapitola je zaměřena na popis úlohy kolportéra novin a její možné využití v OH. V závěru teoretické části je uvedena metoda FMEA a její výhody v oblasti bezpečnostní analýzy. V úvodu praktické části (Kapitola 5) jsou zpracována data, která slouží jako vstupní parametry pro řešení scénářové úlohy. Kapitola 6 je věnována definování optimalizační úlohy velikosti OB a sestavení matematických modelů 1 a 2. Dále je v textu uvedeno scénářové řešení optimalizační úlohy (kapitola 7), prostřednictvím

softwaru GAMS s následným porovnáním výsledků. Poslední kapitola bakalářské práce je věnována dopadu optimalizace OB na bezpečnostní stav ZEVO.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMUNÁLNÍ ODPAD

Vytvoření plánu pro efektivní nakládání s komunálním odpadem (KO) obsahuje problematiku energetického využití odpadu. To vyžaduje existenci dat popisující produkované množství a konkrétní vlastnosti odpadu v dané oblasti. Data jsou využita k analýze současné situace a k následné predikci produkce odpadu v budoucnosti. Sběrem dat o produkci a zpracování KO se zabývá Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Jeden z mnoha subjektů spadající pod MŽP, jsou skládky a jiní zpracovatelé odpadu, které představují důležitý zdroj informací [1]. Ty ovšem mohou vykazovat jistou neúplnost a mohou být zatíženy chybami. Pro verifikaci, agregaci a uchování dat slouží Informační systém odpadového hospodářství. Značnou překážkou ve sběru dat je ilegální zpracování odpadu, které vede k celkovému zkreslení popisované situace [2].

Hrubý odhad tvorby odpadu v oblasti je možný získat pomocí výrazu:

$$\text{Odpad} = \beta_0 + \beta_1(\text{ekonomický rozvoj}) + \beta_2(\text{populace}) + \beta_3(\text{plocha země}) + \varepsilon [3].$$

Kde  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , a  $\beta_3$  jsou proměnné a  $\varepsilon$  možná odchylka.

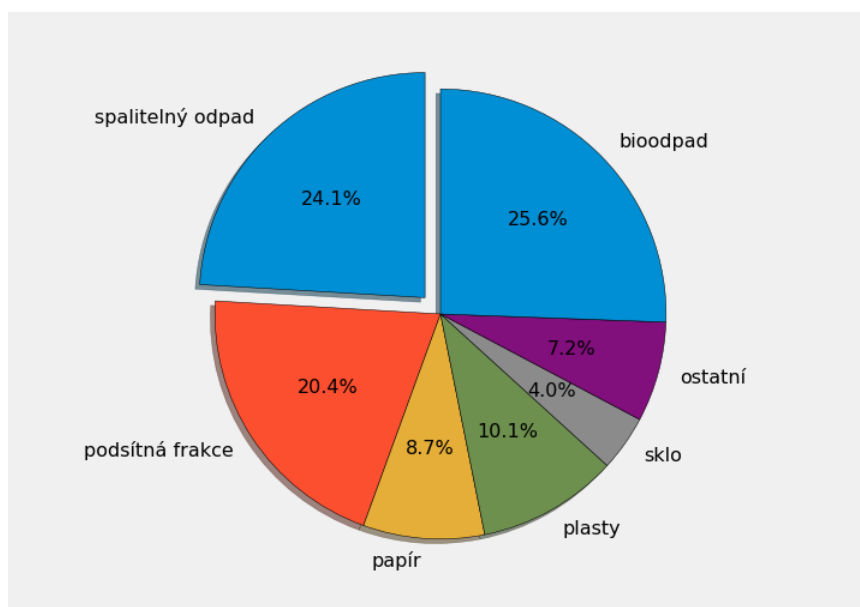
### 1.1 Dělení odpadu

S ohledem na téma bakalářské práce (*Optimalizace odpadního bunkru s ohledem na vynucené odstávky provozu*) bude uvažován pouze pevný KO. Ten je možné rozdělit do následujících skupin.

- 1. Rezidenční odpad** – Materiál, který pochází z domácností. Je tvořen obyvateli rodinných domů. Nejčastějším typem jsou kuchyňské a potravinářské odpady, jejichž hlavní nevýhodou je rychlý rozklad. Domácnosti dále produkují hořlavé materiály, jako například papír, lepenka a plasty a další typy odpadů.
- 2. Komerční odpad** – Komerční odpad je produkován zejména restauracemi, hotely, kancelářemi, maloobchodními a velkoobchodními prodejny. Jeho složení je až na zvýšenou četnost kovů, skla a půdy podobné jako u rezidenčního odpadu [2].
- 3. Speciální odpad** – Jedná se o odpad se specifickými vlastnostmi, který vyžaduje mimořádného zacházení. Do této skupiny jsou zahrnuty materiály jako: cihly, betonová drť, nábytek, řezivo, kameny a elektronické součástky [2].

## 1.2 Energetické využití odpadu

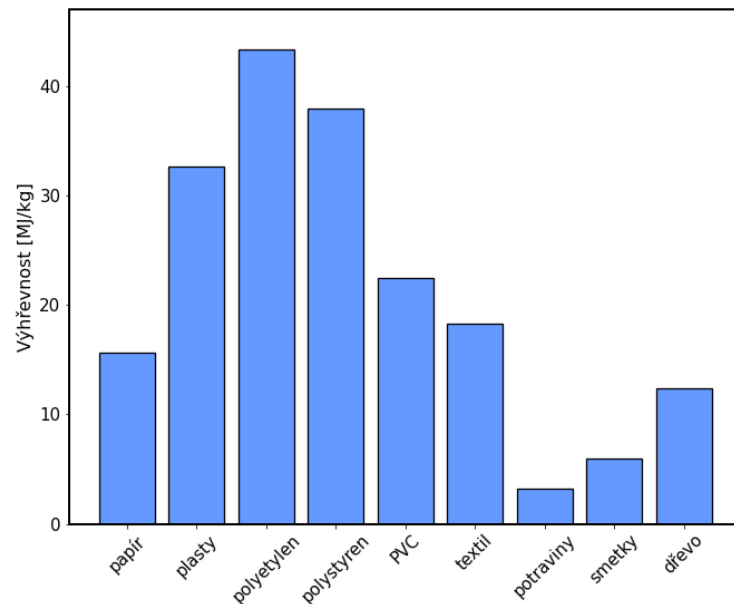
Problematika energetického využití odpadu, spočívá zejména v rozmanitosti jeho prvkového složení. Výhřevnost odpadu lze obecně považovat za dostačující, avšak kolísavý obsah vody a nehomogenita celkové struktury vyžaduje využití specifických spalovacích technologií (Kapitola 2). Dalším problémem je relativně velké zastoupení popelovin (zemina, stavební suť a popel) v odpadu, které vzhledem ke svým nepříznivým vlastnostem (sypná hmotnost a výhřevnost) zpřičňuje zpomalení procesu zpracování odpadu [4]. Obrázek 1 reprezentuje průměrné složení směšného komunálního odpadu (SKO) v České republice za rok 2019. Pojem SKO označuje směšnou část KO, která zůstává po vytrídění využitelných složek a je dále zpracována v ZEVO.



Obrázek 1: Složení SKO v ČR. za rok 2019 [5].

Složení odpadu je závislé na oblasti svozu. Například sídliště produkují převážně odpad kompostového charakteru, který obsahuje vyšší vlhkost. Výhodou odpadu pocházejícího z výše uvedeného typu oblasti je drobný podíl popelovin a vysoký podíl spalitelného odpadu. Lokality příměstského typu, na druhou stranu, produkují odpad s vyšším procentem nespalitelné složky, což se nepříznivě projevuje na výsledných vlastnostech odpadu. Odpad pocházející z drobnějších obcí obvykle disponuje nejlepšími vlastnostmi pro spalování, a to z důvodu vysokého obsahu hořlavých složek (dřevo, plasty) a malého podílu rozložitelného odpadu [6]. V reálné situaci ZEVO sváží KO z rozsáhlých oblastí, které zahrnují všechny typy odpadu.

Výhřevnost odpadu reprezentuje efektivitu jeho spalování. Výhřevnost se běžně uvádí v jednotkách [MJ/kg]. Základní informace o výhřevnosti jednotlivých složek KO jsou shrnuty na obrázku 2.



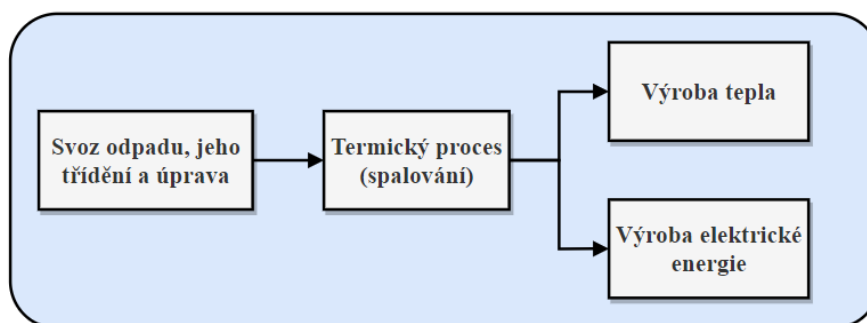
Obrázek 2: Výhřevnost složek KO [7].

Z obrázku 2 je možné vyčíst, že nejlépe hořlavou složkou v KO je polyetylen s výhřevností 43,4 MJ/kg. Za dobře hořlavé materiály lze považovat také polystyren, plast, PVC a papír. Mnohem nižších hodnot výhřevnosti naopak dosahují materiály jako potraviny, smetky a štěpka.

## 2 ZAŘÍZENÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU

Spalování odpadu je v současné době stále považováno za nejvíce vyspělou technologii pro energetické využití odpadu [8]. Česká republika disponuje celkově čtyřmi ZEVO, které se nachází v Brně (Sako Brno a.s.), Liberci (Termizo a.s.), Plzni (Plzeňská teplárenská a.s.) a v Praze (Pražské služby a.s., ZEVO). Zpracovatelské kapacity českých ZEVO se pohybují v intervalu od 90 do 330 kt/r. Nová generace ZEVO prošla značnou modernizací. Ta vedla k signifikantnímu navýšení výkonu spalování a zároveň ke zredukování nepříznivého dopadu na životní prostředí (filtrace nežádoucích látek). Veřejnost, nicméně, stále vnímá zpracování odpadu pomocí spalování spíše negativně, a to převážně kvůli špatné informovanosti, a to zejména v environmentální otázce [8].

Zařízení pro energetickou transformaci odpadu je možné klasifikovat dle využití vyrobené energie po procesu spalování do tří skupin. i) ZEVO je orientována na výrobu tepelné energie, která je následně distribuována do okolí. ii) Energie, získaná spálením odpadu, je převedena pomocí speciálních turbín na elektrickou energii, která je následně rozvedena do sítě. iii) Poslední variantou je fúze výše uvedených řešení, tedy kogenerační výroba tepelné i elektrické energie. Představené řešení reprezentuje nejpoužívanější typ ZEVO, neboť bere v potaz časově proměnnou poptávku po teple a elektřině [9].







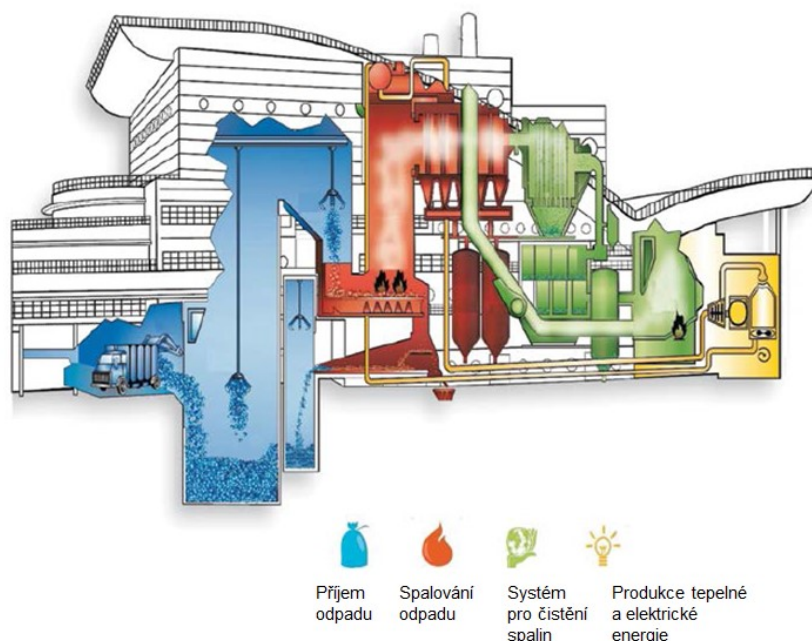
Obrázek 3: Zjednodušené schéma zpracování odpadu.

Další výhodou procesu spalování, je redukce objemu vyprodukovaného KO. Spalování odpadu tedy slouží také jako prevence proti tvorbě skládek, které jsou finančně nákladné a neekologické.



## 2.1 Popis zařízení pro energetické zpracování odpadu

Interní procesy probíhající v ZEVO jsou detailně vyobrazeny na obrázku 4. Celý průběh je možné rozdělit do čtyř základních fází: příjem odpadu (  ), spalování odpadu (  ), systém pro čištění spalin (  ) a produkce tepelné a elektrické energie (  ). Důkladný popis technologického procesu ZEVO bude podrobněji rozepsán v kapitole 2.1.2.



Obrázek 4: Schéma popisující ZEVO [8].

### 2.1.1 Základní komponenty ZEVO

Efektivní provoz ZEVO je podmíněn přítomností pěti klíčových komponent. Ty jsou zodpovědné za plnění esenciálních úseků celého procesu, konkrétněji: 1. skladování odpadu OB; 2. spalování odpadu (spalovací komora); 3. kotel (výroba tepelné energie); 4. plnění environmentálních kvót (kontrola pro znečištění ovzduší) a 5. parní turbína (převod tepelné energie na elektrickou) [10].

### 2.1.2 Technologický proces zpracování odpadu

Odpadní vozidla jsou při vjezdu do prostorů ZEVO zvážena pomocí mostních vah. Z procesu vážení jsou následně odečteny základní informace o přivezeném odpadu (typ odpadu, jeho hmotnost, datum svozu a původ odpadu). Z místa vážení je nákladní vozidlo přesunuto do výklopné haly, kde dochází k vyložení odpadu do OB.

Primární funkcí OB, je dočasné skladování odpadu. Jeho kapacita se odvíjí od množství spalovnou spáleného odpadu a velikosti tzv. nutné kapacitní rezervy (část kapacity bunkru schopná pokrýt nadbytečný odpad nahromaděný například za stavu neplánované odstávky). Dle odborné literatury je za ideální velikost nutné kapacitní rezervy považována taková, která při výjimečném stavu dokáže pojmout odpad až v horizontu sedmi dní [8]. Součástí OB je také sada mostových jeřábů, které slouží k promíchávání odpadu. Zajištění dobré homogenity zlepšuje celkové vlastnosti odpadu, což vede ke zkrácení doby potřebné k jeho zpracování a napomáhá k dodržování provozního režimu, na který je technologie ZEVO konstruována.

Z OB je odpad následně transportován pomocí mostových jeřábů do vstupní násypky roštového ohniště, kde je postupně spalován. Spalování probíhá za teplot v rozmezí 850 až 1100 °C. Proces spalování odpadu vytváří teplo, které je následně využito k ohřevu vody v kotli. Vygenerovaná pára dále slouží jako zdroj tepla pro obytné okolí anebo je hnána přes parní turbínu, kde je převedena na elektrickou energii.

### 2.1.3 Porovnání kapacit odpadních bunkrů v ČR

V kapitole 2. byly uvedeny ZEVO nacházející se na území České republiky. V tabulce 1. jsou porovnány jejich roční průměrné zpracovatelské kapacity a kapacity OB.

Tabulka 1: Porovnání kapacit českých ZEVO.

Název ZEVO	Zpracovatelská kapacita [kt/r]	Kapacita OB [m <sup>3</sup> ]
Sako Brno a.s (Brno) [11]	248	16 875
Termizo a.s (Liberec) [12]	90	3 000
ZEVO a.s (Praha) [13]	330	11 000
ZEVO a.s (Plzeň) [14]	105	4 300

### 3 ILUSTRAČNÍ ÚLOHA PRO OPTIMALIZACI SKLADOVACÍCH ZÁSOb

Pro porozumění úlohy optimalizace velikosti OB, ve kterých není dopředu známo množství a vlastnosti vyprodukovaného/spáleného odpadu, je nejprve zapotřebí čtenáře uvést do již známých optimalizačních úloh podobného charakteru.

Kapitola slouží k popisu problematiky modelování, pro inventář jednopoložkového typu. Dále je předpokládáno, že poptávka je stochastická a problematika se odehrává v určitém časovém intervalu. Odborně je tento problém znám jako úloha kolportéra novin (Newsvendor problem – NP) [15]. Ta popisuje situaci prodejce novin, který se musí rozhodnout, jak velké množství novin musí nakoupit, aby vyhověl nadcházející poptávce. Cílem prodejce čelícího jednopoložkovému typu inventáře se stochastickou poptávkou, je vypočítat optimální množství zboží, pro stanovenou časovou periodu tak, aby dosáhl maximálního očekávaného zisku [16]. V úloze je předpokládáno, že není k dispozici žádný inventář a poptávka po zboží je náhodného charakteru, který je reprezentován pravděpodobnostní funkcí. NP může být nejjednodušeji vysvětlen na následujícím příkladu:

Každé ráno, se prodejce musí rozhodnout, kolik novin pro daný den nakoupí. Pokud prodejce správně neodhadne poptávku a nakoupí zbytečně velké množství novin, na konci dne bude nucen vzniklý přebytek vyhodit nebo přeprodat za cenu papíru. Na druhou stranu, pokud prodejce nakoupí příliš malé množství novin, tak zboží nevyjde pro každého zákazníka a tržby nedosáhnou svého maximálního potenciálu. Úkolem prodejce je tedy nalézt optimální množství novin, které musí pro daný den nakoupit [17].

NP nachází v současné době širokou škálu aplikací. Důvodem rostoucího zájmu o optimalizační úlohy, je rychlá expanze služeb na trhu práce. Modifikované úlohy, se mohou například zabývat také zbožím, které je možné prodávat více než jedno prodejní období (prodavačka květin – Flower girl problem) [15].

#### 3.1 Historie úlohy kolportéra novin

První zmínky o úloze kolportéra novin jsou datovány na konec 19. století. Ekonom Francis Edgeworth jako první aplikoval své znalosti matematické úlohy optimalizace na problém toku peněz v bance [18]. Nicméně až od roku 1950 se stal NP předmětem vážnějších akademických studií. Zásadní dopad na oblast optimalizace představovala formulace základního modelu popsaného v kapitole 3.2. V roce 1955 se začínaly objevovat první

modely zahrnující vliv a vývoj ceny. Upravené varianty úlohy kolportéra novin jsou stále využívány i v současnosti [15].

### 3.2 Ukázka základního modelu

Je uvažována následující situace: Kolportér se před začátkem prodejní sezóny (na začátku každého pracovního dne) musí rozhodnout jaké množství novin  $x$  nakoupí za cenu  $c$ . Dále je stanovena pevná prodejní cena  $p$ , která značí cenu za jeden kus novin. Nastane-li případ, kdy poptávka po novinách  $\varepsilon$  je vyšší než počet nakoupených novin  $x$ , kolportér ztrácí možný zisk. Pro vyjádření ušlého

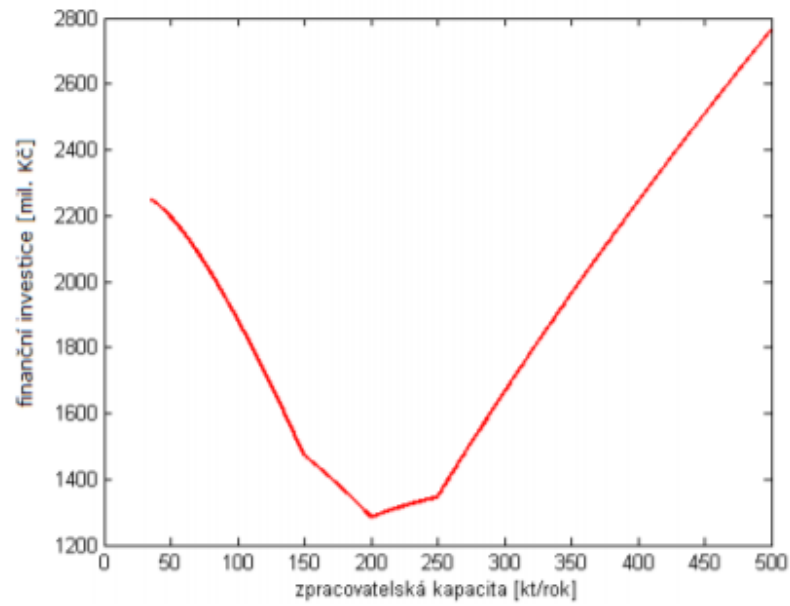
zisku slouží jednotková pokuta  $s$ . V případě, kdy je poptávka po novinách  $\varepsilon$  menší než množství nakoupených novin  $x$ , je zapotřebí stanovit cenu  $v$  značící cenu remitendy.

$$\omega(x, \varepsilon) = \begin{cases} px - cx - s(\varepsilon - x) & x < \varepsilon, \\ p\varepsilon - cx + v(x - \varepsilon) & x \geq \varepsilon. \end{cases}$$

Cílem účelové funkce je nalezení optimálního množství novin  $x$  tak, aby kolportér dosáhl maximálního zisku. NP je v oblasti optimalizace hojně využíván, což dokazuje velké množství publikovaných prací a knih popisujících postup řešení úlohy [16].

### 3.3 Aplikace NP v odpadovém hospodářství

V roce 2011 byla opublikována vědecká práce [19] zabývající se aplikací úlohy kolportéra novin rozšířenou o stochastické programování na problematiku optimalizace zpracovatelské kapacity ZEVO. Konkrétněji, autoři řešili problém maximalizace výnosů ZEVO generovanými prodejem tepla při minimálních nákladech. Přičemž byl uvažován předpoklad, že poptávka po teple nabývala neurčitého charakteru. Optimalizace pak byla provedena pro tři konkrétní scénáře dodávky tepla při pevně stanovené ceně za prodej (42 000 Kč/TJ). Dále byl v publikaci zohledněn stav nenasycení poptávky, pro který byly stanoveny penále za nedodané teplo v (60 000 Kč/TJ). Průběh získané účelové funkce (závislost nákladu na kapacitě) je graficky znázorněn na obrázku 5 [19].



Obrázek 5: Zobrazení účelové funkce [19].

Optimalizace kapacity OB představuje další problematiku odpadového hospodářství, na kterou lze aplikovat úlohu NP. Řešení takové situace je detailně popsáno v praktické části bakalářské práce.

## 4 ANALÝZA MOŽNÉHO VÝSKYTU A VLIVU DAT

Analýza možného výskytu a vlivu dat (failure mode and effect analysis – FMEA) je metoda využívána k definování, identifikování a eliminaci známých a potenciálně možných problému poruch a vad dříve, než se skutečně vyskytnou [20].

K metodě je možné přistupovat dvěma způsoby. První, za pomoci využití historických dat, které se zabývaly problematikou reklamace, poruch nebo jimi úzce spjatou tematikou. Druhý přístup k metodě využívá znalosti z oboru inferenční statistiky, matematického modelování, simulací a pravděpodobnosti výskytu jevů. Oba přístupy metody FMEA jsou považované za efektivní, přesné a zaleží pouze na počátečních podmínkách dané úlohy.

Správné využití metody FMEA vede k získání zásadních informací ohledně zkoumaného systému, pomocí kterých je následně možné navrhnout opatření, která napomáhají ke stabilitě systému jako celku [21]. V OH, je možné metodu využít pro odhalení bezpečnostních hrozeb působících na aktiva ZEVO. Znalost stavu systému, následně umožňuje zavedení nových opatření, která sníží pravděpodobnost výskytu uvedených hrozeb na přijatelné hodnoty.

### 4.1 Historie metody FMEA

První využití metody FMEA, je zaznamenáno v první polovině 20. století firmou Lockheed, na plánování a výrobu bojových letounů P-80 Shooting Star. V roce 1949 byla metoda implementována do amerického vojenského předpisu MIL-P-169 pro hodnocení spolehlivosti. Od roku 1960 byla metoda využívána v programu Apollo (Národním úřadem pro letectví a kosmonautika – NASA) na snížení rizika systému. Následovala standardizace metody a její uvedení do mnoha odvětví komerčního průmyslu. Důkazem kvality metody FMEA je její stále užívání po celém světě [22].

### 4.2 Výhody metody FMEA

Za hlavní přínosy metody FMEA lze považovat:

1. Ohodnocení rizika možných poruch a stanovení opatření
2. Systémový přístup
3. Tvorba informativní dokumentace
4. Nízké náklady k poměru možné finanční ztráty výskytem vad

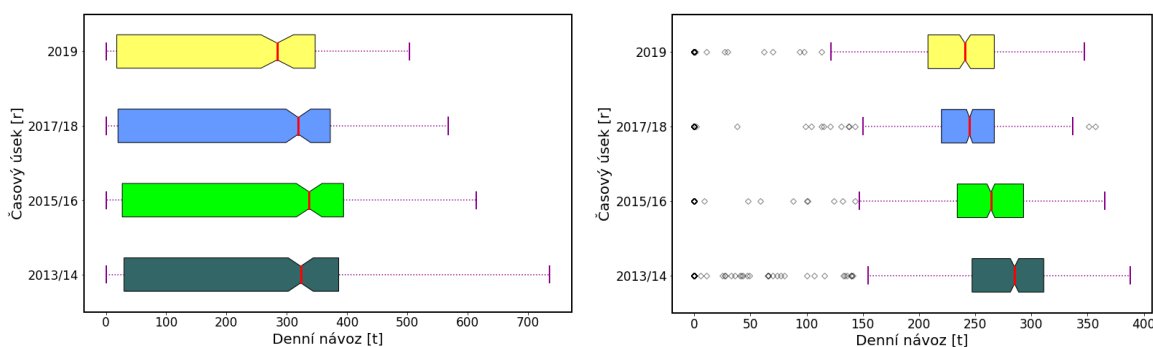
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 VSTUPNÍ DATA

Reálná data, poskytnutá Libereckým ZEVO Termizo a.s, budou uvažována jako vstup pro matematické modelování za účelem co nejbližšího přiblížení se reálné situaci. Průměrná zpracovatelská kapacita ZEVO Termizo a.s. v letech 2013 až 2019 nabývá hodnoty 90 kt/r, s odhadovanou výrobou tepla 600 TJ/r. Klíčová data, potřebná k výpočtu kapacity OB jsou graficky znázorněna v následující kapitole.

### 5.1 Návoz a spalování odpadu v ZEVO

Na obrázku 6 je zobrazen dovoz a spalování odpadu v letech 2013 až 2019. Z prezentovaných grafů je možné vyčíst základní statistické veličiny pro každou dvojici let, konkrétněji: první a poslední decil, hodnoty dovozu/zpracování, medián, první a třetí kvartil a tzv. “vousy“.



Obrázek 6: Boxplot denního návozu/zpracování

Numerické hodnoty základních statistických údajů jsou dále přehledně shrnuty v tabulkách 2 a 3.

Tabulka 2: denní návoz odpadu.

Dovoz odpadu	Min. hodnota	$Q_1$	Medián	$Q_3$	Max hodnota
2019	0	18	284	347	503
2017/18	0	20	319	372	568
2015/16	0	27	337	394	614
2013/14	0	30	323	386	713

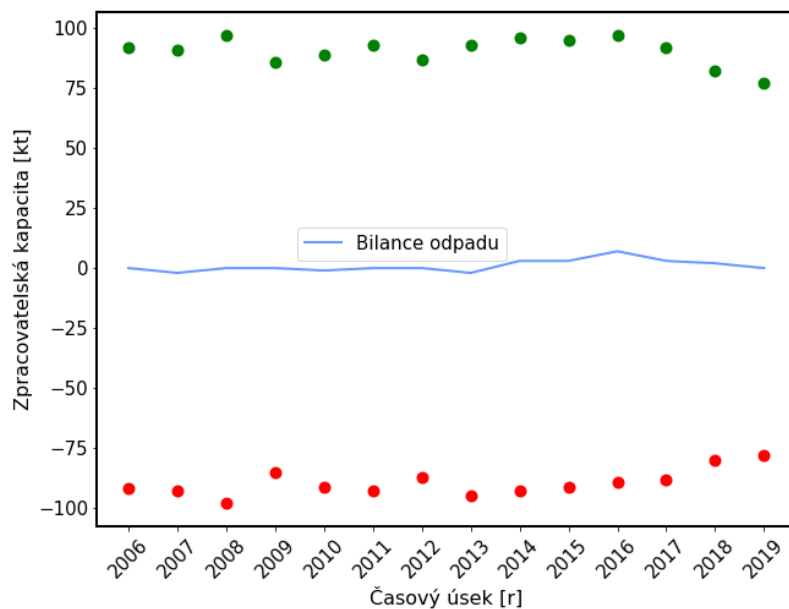


Tabulka 3: denní zpracování odpadu.

spalování odpadu	Min. hodnota	$Q_1$	Medián	$Q_3$	Max hodnota
■ 2019	155	247	285	311	388
■ 2017/18	147	234	264	293	365
■ 2015/16	150	220	245	267	337
■ 2013/14	122	208	241	267	347

## 5.2 Bilance odpadu

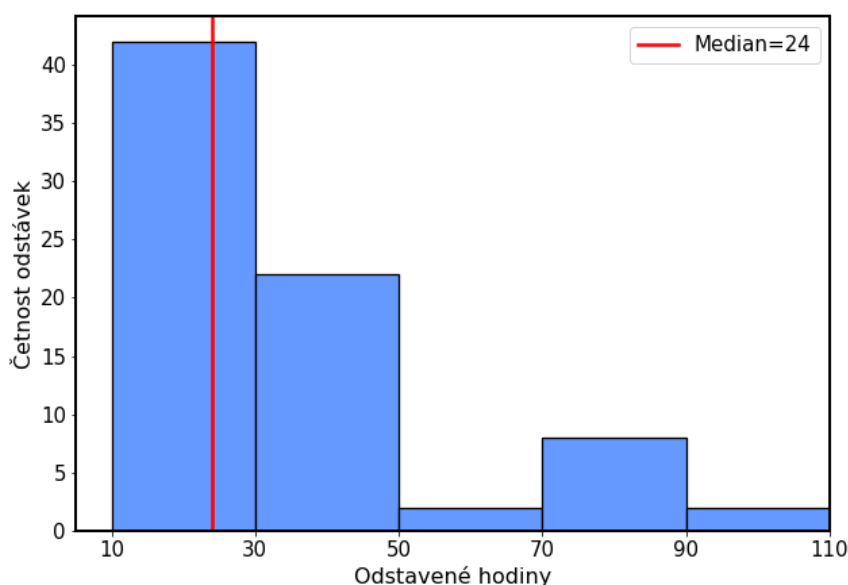
Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, zpracovatelská kapacita ZEVO Termizo a.s. se za poslední roky pohybuje kolem hodnoty 90 kt/r. Obrázek 7 zobrazuje roční hodnoty dovozu (zelené body) a zpracovaného odpadu (červené body). Bilance odpadu je definována jako rozdíl těchto dvou hodnot (modrá křivka). Hodnoty zpracovatelské kapacity jsou využity v kapitole 5–7, jako krajní limity daných úloh.



Obrázek 7: bilance odpadu.

### 5.3 Vynucené odstávky v ZEVO

Vynucené odstávky provozu v ZEVO zapříčiňují pozastavení spalování odpadu, což vede k naplnění OB a k následnému převozu odpadu z bunkru na skládky nebo lépe do jiného ZEVO. Problematika převozu a skladování odpadu byla detailně popsána v předcházejících kapitolách, kde byl kladen důraz zejména na finanční náročnost převozu a následného skladování odpadu na skládkách a na negativní ekologické dopady, které výše uvedené procesy pro okolí představují. Je tedy nutností, aby OB disponoval určitou rezervou ve své kapacitě pro případy vynucených odstávek ZEVO. Na obrázku 8 je znázorněna četnost odstávek, které jsou rozděleny podle doby trvání do pěti intervalů.

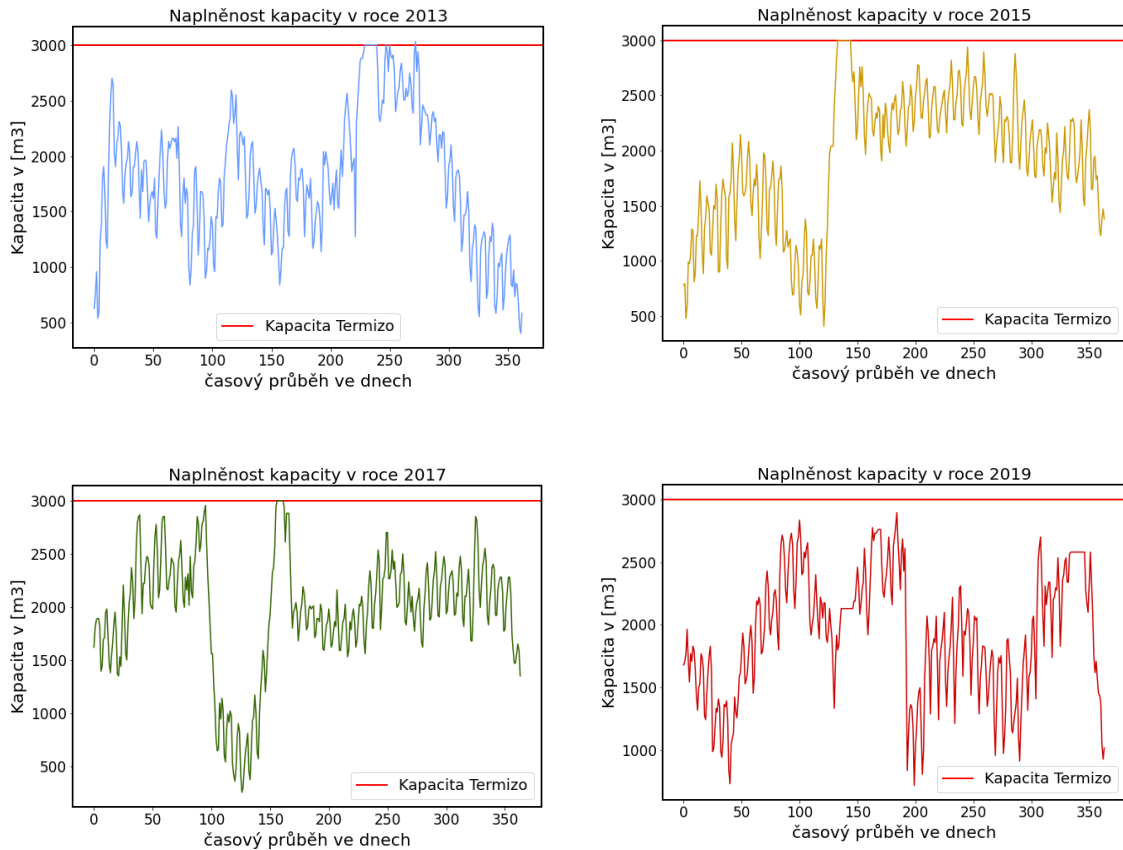


Obrázek 8: četnost odstávek.

Z histogramu je zřejmé, že nejvíce vynucených odstávek se vyskytuje v intervalu  $\langle 10, 30 \rangle$  hodin. Jedná se o poruchy drobnějšího charakteru, které je možné opravit v průběhu jednoho dne. Druhou nejčetnější skupinu (interval  $\langle 30, 50 \rangle$  hodin) tvoří poruchy středního typu. Zbývající vynucené odstávky v intervalech  $\langle 50, 70 \rangle$ ,  $\langle 70, 90 \rangle$  a  $\langle 90, \infty \rangle$  hodin, tvoří závažnější až vážné poruchy ZEVO. Z histogramu je patrné, že četnost vážných poruch je mnohonásobně nižší, a to z důvodu pravidelných kontrol a revizí ZEVO.

## 5.4 Zaplněnost odpadního bunkru

Na obrázku 9 je zobrazena naplněnost OB v letech 2013 až 2019. Hodnota 3000 m<sup>3</sup> (červená křivka) označuje maximální kapacitu OB ZEVO Termizo a.s.



Obrázek 9: Naplněnost OB.

Průměrnou hodnotu naplněnosti bunkru (PN) lze vypočítat pomocí aritmetického průměru, tedy:

$$PN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1903 \text{ m}^3$$

Zanalyzovaná data, získaná ze ZEVO Termizo a.s, budou využita pro řešení problematiky optimalizace OB pomocí modelu NP. Definice problému a jeho celé řešení bude detailně popsáno v následující kapitole.

## 6 OPTIMALIZACE VELIKOSTI ODPADNÍHO BUNKRU

OB je nedílnou součástí ZEVO. Správná optimalizace této jednotky vede k ušetření finančních zdrojů a zároveň výrazně přispívá ke zvýšení bezpečnosti práce při manipulaci s odpadem.

Primárním cílem úlohy optimalizace velikosti OB, je stanovení rozsahu počáteční investice a stanovení velikosti OB. Investor je nucen na začátku projektu rozhodnout, jak velká finanční investice  $I$  bude na stavbu přidělena. Investice  $I$  se odvíjí od kapacity  $x$ , která udává, jak velké množství odpadu je ZEVO schopné pojmout. V problematice optimalizace OB mohou nastat dvě limitní situace.

- A. Investice  $I$  bude pro zpracovatelskou kapacitu  $s$  ohledem na možné odstávky  $D$  zbytečně vysoká, a tudíž dojde k předdimenzování OB. Nastane tedy situace, kde  $x \geq D$ . Následkem výše uvedeného případu je nadbytečné plýtvání finančními zdroji.
- B. Investice  $I$  do OB bude nedostačující, a tudíž dojde k jeho poddimenzování. Pro vzniklou situaci bude platit výraz  $x < D$ . Přebytný odpad bude muset být, kvůli nedostatečné kapacitě, převážen ze ZEVO obvykle na skládky.

Převoz odpadu je ovšem finančně náročný. Sekundárně, tento proces napomáhá ke tvorbě skládek, což představuje nežádoucí jev z pohledu dalšího vývoje odpadového hospodářství. Nadále je potřebné uvažovat možné riziko, které kupení odpadu na skládkách představuje pro obývané okolí a jeho nepříznivé ekologické dopady. Výše uvedené faktory lze do procesu optimalizace zahrnout zavedením parametru  $s$ , který reprezentuje pokutu za převoz a kupení odpadu.

Pro další přiblížení matematického modelu reálným situacím, je v neposlední řadě nutné zavést parametr  $\varepsilon$  zohledňující náhodné a neurčité prvky jako například tvorba odpadu, jevy ovlivňující vlastnosti odpadu detailněji popsáno v kapitole 1. a nutné zásahy do systému svozu, které mohou mít dopad na variabilitu přivezeného odpadu v čase.

Primárním cílem úlohy optimalizace velikosti OB, je stanovení rozsahu počáteční investice a stanovení velikosti OB.

## 6.1 Formulace modelu 1

V této části textu se jedná o zjednodušenou deterministickou úlohu, která poskytuje základní vhled do problematiky, a ve které jsou uvažovány výše uvedené krajní situace, popisující problematiku předdimenzování a poddimenzování OB při špatně zvolené investici.

Účelová funkce nabývá tvaru:

$$\psi(D_{(\varepsilon)}, x) = \begin{cases} I_{(x)} + s[D_{(\varepsilon)} - x] & \text{pro } x < D_{(\varepsilon)}, \\ I_{(x)} & \text{pro } x \geq D_{(\varepsilon)}. \end{cases} \quad (1.1)$$

Investice do OB  $I_{(x)}$  je popsána jako:

$$I = cx. \quad (1.2)$$

Kde  $c$  je cena za jednotku kapacity a  $x$  kapacita ZEVO.

Minimalizace střední hodnoty účelové funkce  $\psi(D_{(\varepsilon)}, x)$  vede k optimální hodnotě kapacity OB, která úzce souvisí s ideální hodnotou investice.

### 6.1.1 Hledání optimálního množství

Je dáno obecné rozdělení náhodné proměnné  $\varepsilon$  s hustotou rozdělení  $f(t)$  a s distribuční funkcí  $F(t)$ . Střední hodnota účelové funkce:  $E\psi(D_{(\varepsilon)}, x)$  značená jako  $\Psi(x)$ , nabývá tedy tvaru  $E[\psi(D_{(\varepsilon)}, x)] = \Psi(x)$ .

Očekávanou hodnotu účelovou funkce  $\Psi(x)$ , lze vyjádřit jako:

$$\Psi(x) = E[\psi(D_{(\varepsilon)}, x)] = \int_{x < t} [cx + s(t - x)] f(t) dt + \int_{x \geq t} [cx] f(t) dt. \quad (1.3)$$

Dále je uvažována dolní a horní hodnota přívozu odpadu  $D_{(\varepsilon)}$ , tedy pravděpodobnost  $P(D_{(\varepsilon)} \in [A, B]) = 1$ . Následně je možné přepsat střední hodnotu jako:

$$\Psi(x) = \int_x^B [cx + s(t - x)] f(t) dt + \int_A^x [cx] f(t) dt. \quad (1.4)$$

Po úpravě výrazu (1.4) je možné vyjádřit tvar střední hodnoty.

$$\Psi(x) = cx - cx F(x) + s \int_x^B (t - x) f(t) dt + cx \int_A^x f(t) dt. \quad (1.5)$$

Kde:  $s \int_x^B (t - x) f(t) dt$  je vyřešen za pomoci metody per partes (viz příloha A).

Pro zjištění minima funkce  $\Psi(x)$  je zapotřebí nalézt extrém funkce. Nalezení extrému vyžaduje vyřešení podmínky  $\frac{d\Psi}{dx} = 0$ .

$$\frac{d\psi}{dx} = c - s + sF(x).$$

Následně je nutné ověřit, zdali nalezený extrém je globálním minimem V takovém případě musí platit, že druhá derivace  $\frac{d^2\psi}{dx^2}$  je větší než nula, tedy  $\frac{d^2\psi}{dx^2} > 0$ .

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = sf(x).$$

Kde  $s \geq 0$  a  $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) = 1$ , platí tak, že  $\frac{d^2\psi}{dx^2} > 0$  z čehož lze implikovat, že funkce  $\psi$  je konvexní a lokální minimum je i minimem globálním získané vyřešením podmínky:

$\frac{d\psi}{dx} = 0$ . Pak je tedy optimální kapacita  $x^*$  určena jako:

$$F(x^*) = \left(\frac{c-s}{-s}\right).$$

Existuje-li k distribuční funkci funkce inverzní, dostaneme výraz pro optimální kapacitu  $x^*$ :

$$x^* = F^{-1}\left(\frac{c-s}{-s}\right). \quad (1.6)$$

Optimální kapacita  $x^*$  je vyjádřena za pomoci ceny  $c$ , pokuty  $s$  a inverzní funkcí  $F^{-1}$ . V reálných úlohách obvykle není známé rozdělení pravděpodobnosti pro neurčitou náhodnou veličinu. V těchto případech je možné problematiku nejistoty diskretizovat pomocí scénářů. U každého scénáře je nutné zvolit pravděpodobnost jejich realizace. Výpočet s počátečními parametry získanými z dat v kapitole 5. jsou popsány v kapitole 7.4.

### 6.1.2 Numerické výsledky pro model 1

Konkrétní výpočet představeného modelu je ukázán na vhodně zvolených hodnotách pro vstupní parametry. Je předpokládáno že náhodná proměnná  $\varepsilon$  má rovnoměrné rozdělení, pro které platí:  $\varepsilon \sim R(A, B)$ . Hranice jsou stanoveny na  $A = 80$  kt/r a  $B = 100$  kt/r. Pokuta  $s$  je určena za pomoci výrazu  $s = cp * vz + pk$  kde  $cp$  reprezentuje cenu převozu odpadu [Kč/t],  $vz$  vzdálenost [km], která musí být překonána pro transport a  $pk$  pokutu za skladování odpadu [Kč/t]. Cena  $c$  za jednotku kapacity bunkru  $x$  je stanovena jako  $c = cp + cm$  kde  $cp$  a  $cm$  jsou ceny za provedenou práci a využitý materiál, vše v [Kč/kt].

Po dosazení parametrů do rovnice (1.6) vychází hodnota optimální kapacity  $x^* = 95$  kt. Výslednou kapacitu je zapotřebí převést na stavební kapacitu bunkru  $k_b$ , kterou lze vyjádřit za pomoci výrazu  $k_b = \frac{1000x^*}{o_s} K_1$  kde  $O_s$  značí počet dnů v roce, kdy se odpad do ZEVO dováží:  $O_s = 365 \frac{5}{7} = 261$  dní a  $K_1$  značí koeficient umožňující převod stavební kapacity

bunkru na  $\text{m}^3$ . Po dosazení do výrazu  $k_b = \frac{1000x^*}{o_s} K_1$  vychází stavební kapacita bunkru  $k_b = 3033 \text{ m}^3$ .

### 6.1.3 Vyhodnocení modelu 1

Model 1 představuje poměrně efektivní a rychlý nástroj k dosažení optimalizace OB. Problematika modelu spočívá v nerealistickém předpokladu pro investici  $I_{(x)}$ , která je triviálního charakteru  $cx$ . V reálném případě se ovšem cena s rostoucí kapacitou mění, což následně snižuje výslednou hodnotu investice potřebné pro stavbu OB.

## 6.2 Formulace modelu 2

Řešení problému pomocí modelu 2 zůstává velmi podobné modelu 1. Investor se musí na začátku projektu rozhodnout, jak velká finanční investice případně na stavbu OB, aby nenastalo k poddimenzování nebo předdimenzování. Investice  $I_{(x)}$  se ale nově objevuje ve tvaru  $kcx$ , kde  $c$  je cena za jednotku kapacity  $x$  a  $k$  je koeficient ovlivňující cenu  $c$  na základě limitů  $A$  a  $B$ . Dále se v modelu znovu objevuje pokuta  $s$  za převoz odpadu na skládku. Nově je také do modelu zaveden parametr  $v$  představující cenu za jednotku kapacity postavenou nad limit zpracovatelské kapacity  $D$ . Další inovací je využití parametru  $u$ , který představuje bilanci navezeného a spáleného odpadu v ZEVO. Účelová funkce nabývá tvaru:

$$\psi(\varepsilon, x, u) = \begin{cases} I_{(x)} + s[D_{(\varepsilon, u)} - x] & \text{pro } x < D, \\ kcD_{(\varepsilon, u)} + v[x - D_{(\varepsilon, u)}] & \text{pro } x \geq D, \end{cases} \quad (2.1)$$

a platí, že funkce dovozu  $D(u, \varepsilon) \equiv D(u, \varepsilon_m, \varepsilon_a) = d(u)\varepsilon_m + \varepsilon_a$  funkce dovozu tedy získává aditivní podobu. Dále lze vyjádřit funkci jako:

$$D(u, \varepsilon) \equiv d(u) + \varepsilon_a. \quad (2.2)$$

Pro zlehčení výpočtu je zavedena substituce pomocí nové proměnné  $z$ :

$$z = x - d(u).$$

Následně lze přepsat účelovou funkci  $\psi$  jako:

$$\psi(\varepsilon, z, u) = \begin{cases} kc[z + d(u)] + s[\varepsilon_a - z] & \text{pro } z < \varepsilon_a, \\ kc[d(u) + \varepsilon_a] + v[z - \varepsilon_a] & \text{pro } z \geq \varepsilon_a. \end{cases} \quad (2.3)$$

Nadcházejícím cílem je minimalizace účelové funkce, tedy její střední hodnoty a následně nalezení optimální kapacity OB ve spojitosti s investicí.

### 6.2.1 Hledání optimálního množství

Je uvažováno stejné nastavení parametrů jako v kapitole 6.1.1, tedy střední hodnota účelové funkce lze vyjádřit jako:

$$\Psi(z, u) = E[\psi(u, z, \varepsilon)] = \int_z^B (kc[z + d(u)] + s[t - z])f(t)d(t) + \int_A^z (kc[d(u) + t] + v[z - t])f(t)d(t).$$

Kde po úpravě a vyřešení integrálů:  $s \int_z^B [t - z]f(t)d(t)$  a  $v \int_A^z [z - t]f(t)d(t)$  za pomoci metody per partes (viz příloha B), dostaneme finální podobu střední hodnoty:

$$\Psi(z, u) = kcz + kcd(u) + sB - sz - s\Gamma(B) + s\Gamma(z) + kc\Gamma(A) - kc\Gamma(z) + v\Gamma(z) - \Gamma(z).$$

Po derivaci  $\Psi(z, u)$  podle  $z$  a vyřešení podmínky prvního řádu  $\frac{\partial \Psi(z, u)}{\partial z} = 0$  získáváme optimální výraz  $z$

$$\frac{\partial \Psi(z, u)}{\partial z} = kc - s + sF(z) - kcF(z) + vF(z), \quad (2.4)$$

$$z^* \equiv z = F^{-1}\left(\frac{kc-s}{kc-s-v}\right). \quad (2.5)$$

Dále pro ověření podmínky globálního minima  $\left(\frac{\partial^2 \Psi(z, u)}{\partial z^2} > 0\right)$  kde:

$$\frac{\partial^2 \Psi(z, u)}{\partial z^2} = sf(z) - kcf(z) + vf(z)$$

a platí, že  $s, kc, v \geq 0$  a  $s > kc$ , tak  $(s - kc + v) > 0$  a  $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) = 1$  z čehož vyplývá, že  $\Psi$  je konvexní a lokální minimum je i minimem globálním.

Po dosazení optimálního faktoru  $z$  do  $z = x - d(u)$  dostaneme vzorec pro výpočet optimální kapacity  $x^*$ :

$$x^* = x = z^* + d(u). \quad (2.6)$$

Optimální kapacita  $x^*$  závisí také na funkci odpadní bilance  $d(u)$ . Optimální odpadní bilanci nalezneme vyřešením první derivace  $\Psi(z, u)$  podle  $u$ .

$$\frac{\partial \Psi(z, u)}{\partial u} = kc * \frac{dd(u)}{du}.$$

Kde po dosazení do funkce  $d(u)$  a zderivování získáváme optimální odpadní bilanci  $u^*$

$$x^* = z^* + d(u^*).$$



$$x^* = z^* + (p - j). \quad (2.7)$$

Kde  $p$  je průměrný dovoz odpadu do ZEVO a  $j$  průměrná hodnota spáleného odpadu za časový úsek jednoho roku. Za podmínky že  $u^* \leq 0$ .

### 6.2.2 Numerické výsledky pro model 2

Náhodná proměnná  $\varepsilon$  má rovnoměrné rozdělení, tedy  $\varepsilon \sim R(A, B)$  a její ohraničení jsou stanovena na  $A = 80$  kt/r a  $B = 100$  kt/r. Pokuta  $s$  a cena  $c$  mají stejné vyjádření jako v kapitole 5.3 a parametr  $v$  je určen pomocí vzorce  $v = kc$  kde  $k = 1$ . Koeficient  $k$  se pohybuje v intervalu  $\langle 1, 2 \rangle$  v závislosti na hodnotě ohraničení  $A$  a  $B$ , kde čím vyšší hodnoty  $A, B$  nabývá, tím menší je koeficient  $k$ . Dále stanovme hodnoty  $p = 0,240$  a  $j = 0,250$ .

Po dosazení parametrů do výrazu (2.5) vychází hodnota  $z^* = 95,4$  kt, a odpadní bilance  $d(u) = -0,01$ . Optimální kapacita po zohlednění  $d(u)$  je rovna  $x^* = 95,4 + 0,01$ , tedy doporučení na navýšení svozu odpadu o 10 t. Z výsledné kapacity je dále možné zjistit stavební kapacitu bunkru  $k_b$ , která je následně upravena pomocí koeficientu  $K_1$  na  $m^3$ . Výsledná stavební kapacita  $k_b$  bunkru při použití modelu 2 byla vypočtena na  $3045 m^3$ .

### 6.2.3 Vyhodnocení modelu 2

Model 2 je složitějšího charakteru s požadavkem na znalosti interních procesů ZEVO. Dalším nedostatkem je zvýšení nepřesnosti modelu pro malé a střední ZEVO, kde parametr  $v$  není v reálném případě konstantní, a to z důvodu nedosažení slevy za jednotku kapacity pro velké zakázky. Tvrzení o nepřesnosti dokazuje i výsledná kapacita OB získaná dle modelu 2, která se liší pouze o  $12 m^3$  od té, vypočtené modelem 1. Dalším poznatkem je ne příliš signifikantní příspěvek parametru  $u$ , pro ZEVO s vyváženým dovozem a spalováním, proto je v nadcházejícím modelu zanedbán. Za výhodu lze považovat více realistický tvar investice  $I_{(x)}$  díky koeficientu  $k$ .

## 7 APLIKACE SCÉNÁŘOVÉHO ŘEŠENÍ

V předešlých kapitolách bylo prezentováno řešení problému optimalizace OB za pomoci metody kolportéra novin neboli „Newsvendor problem“ s využitím Gaussova rozdělení pravděpodobnosti. I když se jedná o efektivní metodu, její slabinou je triviální tvar investice  $I(x)$ , který lze ovlivnit mimo jiné přidáním vybraných koeficientů viz. kapitola 6.2. Aplikace stochastického programování na metodu kolportéra novin by ovšem mohlo vést ke zpřesnění výsledků.

Stejně jako v předešlých kapitolách, je řešená úloha rozšířena o náhodné události (vlastnosti a množství dováženého odpadu atd.), které jsou reprezentovány koncovým dimenzionálním náhodným vektorem ( $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ ). Nově lze ovšem problematiku náhodných událostí ošetřit využitím tzv. scénářů, které vytváří množinu určitých konkrétních hodnot náhodného parametru  $\varepsilon$ . Množinu scénářů lze tedy zapsat jako:

$$U = u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Kde  $N$  reprezentuje počet scénářů. Dále je vhodné omezit množinu  $U$  na scénáře s praktickým dopadem na úlohu a vynechat zanedbatelné nebo velmi málo pravděpodobné scénáře. Nastane-li případ, kde množina všech scénářů  $U$  je dostatečně malá, lze v úloze uvažovat všechny scénáře. Uskutečnění scénáře  $u$  pak nastane s pravděpodobností  $p_u, \forall u \in U$ , kde pro pravděpodobnost  $p_u$  platí:

$$\sum_{u \in U} p_u = 1.$$

Hodnota funkce  $\psi(\cdot, \varepsilon)$  následně nabývá tvaru:

$$E_\varepsilon(\psi(\cdot, \varepsilon)) = \sum_{u \in U} p_u \psi(\cdot, \varepsilon_u). \quad (7.1)$$

### 7.1 Wait and see přístup

Wait and see přístup (W&S) lze využít v situaci, kdy je znám náhodný parametr  $\varepsilon$  a jeho znalosti lze využít při rozhodování  $x$ . V případě optimalizace OB je rozhodnutí reprezentováno funkcí náhodného parametru  $x(\varepsilon)$ , jakým může být například kapacita ZEVO známá na základě odpadní bilance ZEVO.

## 7.2 Here and now přístup

Here and now přístup (H&N) provádí rozhodnutí  $x$  bez znalosti náhodného parametru  $\varepsilon$ . Jedná se například o stanovení kapacity ZEVO bez znalosti návozu a zpracování odpadu v ZEVO.

## 7.3 Optimalizace odpadního bunkru

Je uvažován stejný problém, který je popsán v kapitole 6. Cílem je nalezení optimální kapacity OB při co nejmenší investici. Model je sestaven za předpokladu že, dovoz a vlastnosti odpadu nabývají neurčitý charakter. Minimalizační úlohu je tedy možné zapsat ve tvaru:

$$I(x) + \sum_u p_u s(M_{(x)}^-).$$

Za podmínek:

$$A \leq x \leq B,$$

$$M_{(x)}^+ - M_{(x)}^- = x - \varepsilon_u,$$

$$M_{(x)}^+, M_{(x)}^- \geq 0.$$

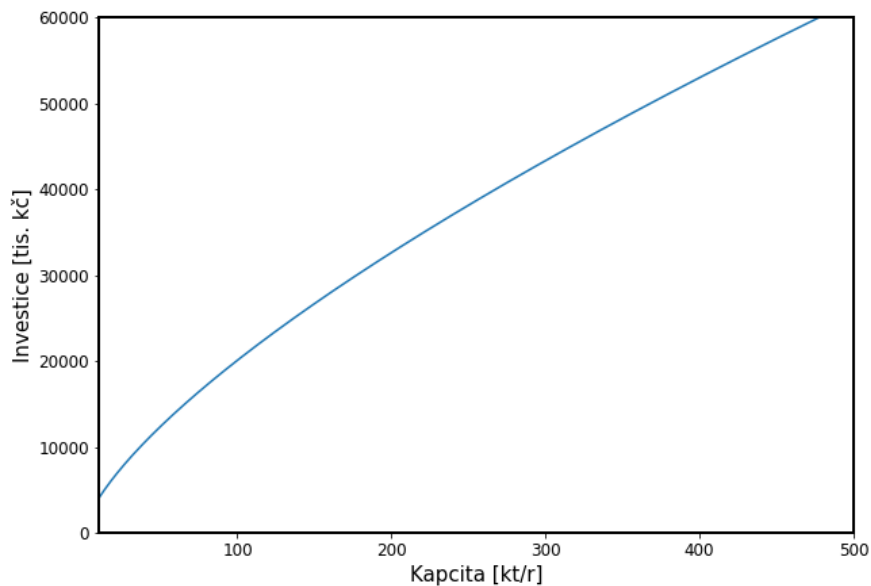
Kde  $x$  reprezentuje jednotku kapacity s omezením  $A, B$ , tedy dolní a horní hranici kapacity,  $I(x)$  je investiční funkce představující náklady na výstavbu OB,  $p_u$  značí pravděpodobnost daného scénáře,  $\varepsilon_u$  je návoz odpadu při scénáři  $u$ ,  $M_{(x)}^-$  označuje nedostatek zpracovatelské kapacity  $x < \varepsilon_u$ , který je následně penalizovaný pokutou  $s$  za převoz odpadu a  $M_{(x)}^+$  značí množství kapacity, které bylo postaveno nad rámec dovozu  $x \geq \varepsilon_u$ .

## 7.4 Numerické výsledky scénářového přístupu

Jsou uvažovány čtyři scénáře zpracovatelské kapacity ZEVO:  $\varepsilon_1 = 80$  kt/r,  $\varepsilon_2 = 85$  kt/r,  $\varepsilon_3 = 90$  kt/r a  $\varepsilon_4 = 95$  kt/r, které byly určeny v kapitole 5. Pravděpodobnost mezi scénáři je rozdělena následovně:  $p_1 = p_4 = \frac{1}{10}$  a  $p_2 = p_3 = \frac{4}{10}$ . Pokuta za převoz odpadu je nastavena pro daný případ na  $s = 520$  Kč/t. Investiční funkce tedy získává více realistický tvar:

$$I(x) = cx^{0,6}$$

Průběh investiční funkce je znázorněn na obrázku 10, kde s rostoucí kapacitou se snižuje poměr ceny za jednotku. Tímto způsobem je možné přiblížení se k realistickému chování ceny za stavbu OB.



Obrázek 10: Investiční funkce

K výpočtu je využit modelovací jazyk GAMS a lokálně konvergentní řešič CONPOPT. Program řešící optimalizaci je umístěn v příloze (C). Výpis výsledků je uveden na obrázku 11.

```

General Algebraic Modeling System
Execution

----      32 VARIABLE Z.L              = 1.255488E+7   ucelova fce
          VARIABLE C.L                  =      95.000   vysledna kapacita
          VARIABLE I.L                  = 1.229488E+7   investice

----      32 VARIABLE PO.L

1 15.000,    2 10.000,    5 95.000

----      32 VARIABLE G.L

4 2600000.000

----      32 VARIABLE NOB.L

4 5.000

```

Obrázek 11: Výpis výsledků v programu GAMS.

Minimum účelové funkce se nachází při kapacitě  $x = 95$  kt/r. Využitím výrazu:

$k_b = \frac{1000x}{o_s} K_1$  lze převést kapacitu OB na kapacitu stavební. Ta nabývá hodnoty  $3000 \text{ m}^3$ .

Investice pro vystavění jednotky o kapacitě  $3000 \text{ m}^3$  je rovna 12 294 tis. Kč Pro ověření ceny získané pomocí investiční funkce, byla oslovena stavební firma IP Systém a.s. Ta provedla praktické necenění OB o srovnatelné kapacitě (viz. příloha D). Cena OB byla vykalkulována na 12 306 tis. Kč. V porovnání s vypočtenou cenou za pomocí investiční funkce se hodnota liší o 12 tis. Kč.

## 7.5 Vyhodnocení scénářového přístupu

Aplikace stochastického programování se scénáři pro metodu kolportéra novin lze považovat za nejvíce realistickou, kvůli vhodně určeným vstupním požadavkům na základě znalostí z kapitoly zabývající se daty ze ZEVO Termizo. Další znatelnou výhodou je možnost zahrnutí scénářů umožňující úpravu úlohy na potřebnou velikost. Funkce popisující investici je konkávního charakteru, a tudíž není zaručeno nalezení globálního maxima, ovšem pro úlohy drobnějšího charakteru by problém neměl být relevantní.

## 8 DOPAD OPTIMALIZACE NA BEZPEČNOST

V předcházející kapitole byly popsány ekonomické dopady spjaté se špatně zvolenou velikostí OB. Ty vedly v obou limitních případech ke ztrátě zisku. Kapitola 8 je zaměřena na bezpečnostní stránku problému optimalizace OB. K evaluaci dopadu optimalizace na bezpečnost ZEVO, je využita metoda FMEA.

Je tedy uvažována situace, kde pro ZEVO byl postaven poddimenzovaný OB. Definovaný stav je pro další využití označen jako: (A–A).

### 8.1 Identifikace a definice aktiv

Za aktivum je možné považovat vše, co má pro ZEVO reálnou hodnotu. V následující tabulce jsou vypsána aktiva, která přímo souvisí s OB. nebo jsou s jeho existencí úzce spjata.

Tabulka 4: aktiva ZEVO

Aktivum	Popis aktiva
Odpadní vozy	Odpadní vozy slouží ke svozu odpadu do ZEVO
Zaměstnanec	Zaměstnanec ZEVO
Biotop okolí	Biotické a abiotické prostředí ovlivněno skládky odpadu
Technologie ZEVO	Kotle, parní turbíny, spalovací komora, mostní jeřáby atd.

### 8.2 Definice zranitelnosti

Zranitelnost je pojem označující slabinu nebo nedostatek aktiva. Jedná se o konkrétní vlastnost, která vede nebo může vést k jeho poškození. Pro identifikaci zranitelnosti lze využít seznam definovaných bezpečnostních kritérií pro jednotlivé sféry bezpečnosti.

### 8.3 Identifikace hrozeb

Hrozba je fenomén, který přímo působí na chráněné aktivum s cílem způsobit jeho dočasné nebo trvalé poškození. Identifikace hrozeb vede k zjištění příčiny zodpovědné za ohrožení chráněného aktiva.

## 8.4 Hodnocení rizik

Za účelem stanovení rizika, jsou určeny tři nová kritéria: význam, výskyt a kritičnost. Škálou kritérií budou věnovány podkapitoly 8.4.1–3. Rizikové číslo (RPN), je definováno jako součin významu, výskytu a kritičnosti. Pokud rizikové číslo přesáhne kritickou hodnotu  $M$ , je zapotřebí aplikovat opatření, které výslednou hodnotu rizika sníží na hodnotu menší nebo rovnu  $M$  (kritická hodnota byla stanovena na  $M = 15$ ).

Tabulka 5: hodnocení RPN

Hodnota RPN	Barva
1–5	žlutá
5–10	zelená
10–15	oranžová
15 +	tmavě zelená

### 8.4.1 Hodnocení výskytu

V tabulce 6 jsou shrnuty pravděpodobnosti možné poruchy. Evaluace je provedena za pomoci číslování v intervalu 1–5, přičemž hodnota 1 značí minimální riziko (výskyt poruchy je velmi nepravděpodobný až vyloučený). Hodnota 5 naopak reprezentuje maximální riziko (výskyt poruchy je téměř jistou událostí).

Tabulka 6: Kvantifikace výskytu poruch.

Kvantifikace výskytu poruch		
Označení	Popis	Číslování
Minimální	Výskyt je nepatrný	1
Nízký	Výskyt je málo četný	2
Střední	Výskyt je četný	3
Vysoký	Výskyt je velmi četný	4
Maximální	Výskyt je jistou událostí	5

### 8.4.2 Hodnocení významu

V tabulce 7 je vyobrazen význam poruchy pro chráněné aktivum. Ohodnocení významu poruchy je opět vyjádřeno pomocí stupnice pohybující se v intervalu 1–5, kde hodnota 1 značí nepodstatný význam poruchy a hodnota 5 představuje poruchu se zásadním efektem pro dané aktivum.

Tabulka 7: kvantifikace významu poruch.

Kvantifikace významu poruch		
Označení	Popis	Číslování
Minimální	Význam je nepodstatný	1
Nízký	Význam je méně podstatný	2
Střední	Význam je podstatný	3
Vysoký	Význam je velmi podstatný	4
Maximální	Význam je rozhodující	5

### 8.4.3 Hodnocení kritičnosti

V tabulce 8 je popsáno hodnocení kritičnosti poruchy. Kritičnost popisuje míru závažnosti, které daná porucha pro hlídané aktivum představuje. Škála hodnocení je provedena stejným způsobem jako v předcházejících podkapitolách. Hodnota 1 tedy představuje velmi malé až nepatrné ohrožení a hodnota 5 reprezentuje velmi vysoké až fatální ohrožení pro aktivum.

Tabulka 8: kvantifikace kritičnosti poruch.

Kvantifikace kritičnosti poruch		
Označení	Popis	Číslování
Minimální	Ohrožení je nepatrné	1
Nízký	Ohrožení je malé	2
Střední	Ohrožení je znatelné	3
Vysoký	Ohrožení je vysoké	4
Maximální	Ohrožení je velmi vysoké	5



## 8.5 Aplikace metody FMEA

Prvním krokem, je využití metody FMEA na stav ZEVO (A–A). V tabulce 9 jsou shrnuty výsledné hodnoty RPN, které nabývají pro všechna aktiva vyšší hodnoty než stanovená norma *M*.

Tabulka 9: FMEA pro stav ZEVO (A–A).

Aktiva	Hrozby	Příčiny	výskyt	význam	kritičnost	RPN
Zaměstnanec	A	Poddimenzovaný OB.	3	4	2	24 ■
		Zanedbané BOZP.				
Vozy pro převoz KO.	B	Poddimenzovaný OB.	3	2	3	18 ■
		Špatné plánování sběrných tras				
Biotop okolí	C	Poddimenzovaný OB.	3	3	2	18 ■
		Odpadové hospodářství				
Technologie ZEVO	D	Poddimenzovaný OB.	4	3	3	36 ■
		Vynechání pravidelných revizí				

### Výpis hrozeb, využitých v tabulce 9 a 10:

- A. zranění zaměstnance při výkonu práce,
- B. dopravní komplikace při převozu odpadu,
- C. ekologické znečištění odpadem,
- D. neplánovaná odstávka provozu.

**Přehled současných opatření při stavu ZEVO (A–A):**

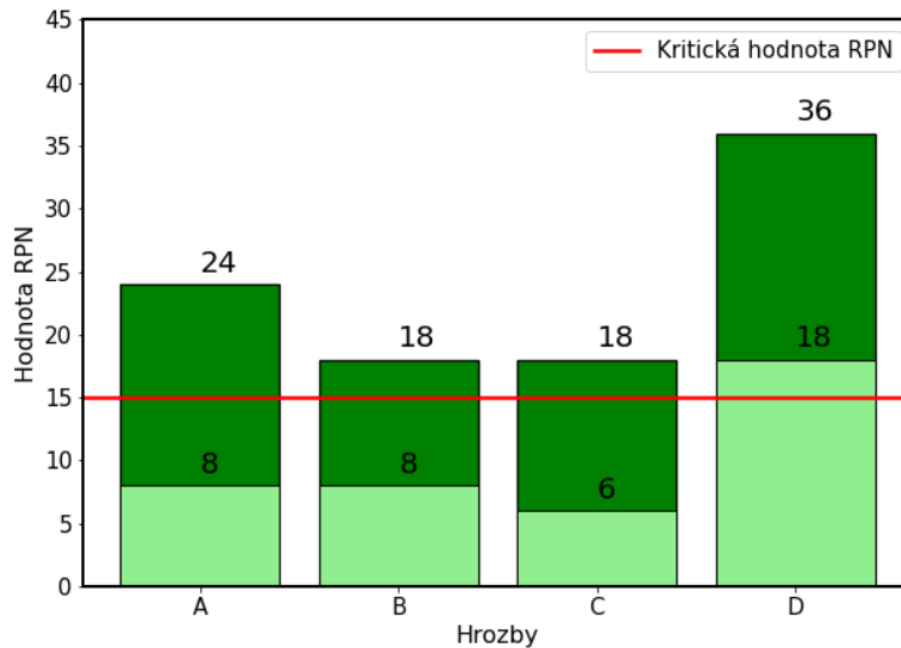
1. kontrola dodržování BOZP a školení zaměstnanců,
2. předem optimalizované sběrné trasy,
3. vhodná politika odpadového hospodářství státu,
4. plánované odstávky provozu, na provedení kontroly a revize technologií.

Překročí-li hodnoty RPN kritickou hodnotu  $M = 15$  (Tabulka 9), je zapotřebí aplikovat opatření snižující riziko na akceptovatelnou úroveň (správná optimalizace OB). Hodnoty RPN po zavedení doporučeného opatření jsou shrnuty v tabulce 10.

*Tabulka 10: FMEA pro stav ZEVO po optimalizaci OB.*

Hrozba	Doporučená opatření	výskyt	význam	kritičnost	RPN
A	<b>Optimalizace OB</b>	1	4	2	8 
B		2	2	2	8 
C		2	3	1	6 
D		3	3	2	18 

Správnou optimalizací OB lze dosáhnout razantního poklesu RPN hodnot (viz. Tabulka 10). Riziko hrozeb A, B a C bylo sníženo z kritického pásma do intervalu RPN (5–10). Neplánované odstávky provozu (D) sice stále přesahují kritickou hodnotu  $M$ , vlivem opatření ovšem došlo k jejich výrazné redukci (50 % z původní RPN hodnoty). Výsledky získané pomocí metody FMEA jsou prezentovány na obrázku 12.



Obrázek 12: výsledky metody FMEA

## 8.6 Zhodnocení dopadu optimalizace na bezpečnost

Cílem kapitoly bylo zhodnocení dopadu optimalizace OB na bezpečnost určených aktiv ZEVO. Za pomoci metody FMEA byla vyhodnocena bezpečnostní rizika pro stav ZEVO (A–A), jenž vykazuje vysoké hodnoty RPN. Pro snížení hodnot RPN, bylo navrženo opatření v podobě optimalizace OB, kterým se zabývají předcházející kapitoly 6 až 7. Následná aplikace doporučeného opatření značně snížila bezpečnostní riziko u chráněných aktiv ZEVO.

## ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byl čtenář uveden do problematiky hospodaření s komunálním odpadem na území ČR a jeho energetické přeměny. Z rešerše literatury vyplynulo, že hlavní problém využití odpadu jako možného zdroje energie spočívá v rozmanitosti jeho prvkového složení prezentováno na obrázku 1. Klasifikace zařízení pro energetické zpracování odpadu (ZEVO) dle využití vyrobené energie a detailní popis technologického procesu zpracování odpadu probíhajícího v těchto zařízeních je detailně popsán v kapitole 2. Následně byla představena úloha kolportéra novin, a její využití v odpadovém hospodářství (Kapitola 3). Závěr teoretické části byl věnován metodě FMEA, která slouží k identifikaci a eliminaci bezpečnostních hrozeb vznikajících v průběhu každého procesu.

V úvodu praktické části předkládané práce byla představena zpracovaná data poskytnutá Libereckým ZEVO Termizo a.s. (Kapitola 5). Ta nadále sloužila jako vstupní parametry pro scénářové úlohy. Následně byla zadefinována úloha optimalizace odpadního bunkru (OB), s primárním cílem stanovení rozsahu investice a kapacity.

Řešení zjednodušené deterministické úlohy (Model 1) představovalo efektivní nástroj k dosažení optimalizace OB. Problematika modelu ovšem spočívala v triviálním vyjádření investiční funkce, která tak neodpovídala reálnému vývoji ceny za jednotku kapacity. V modelu 2, bylo nově využito koeficientu pro upřesnění investiční funkce, jehož hodnota byla určena na základě stanovených limitů ZEVO  $A$  a  $B$ . Další inovací v Modelu 2, bylo využití parametru  $v$ , představující cenu za jednotku kapacity postavenou nad limit zpracovatelské kapacity ZEVO.

Poslední iterací v úloze optimalizace OB, byla formulace scénářové úlohy. Na rozdíl od předcházejících modelů, byla neurčitost vyjádřena za pomoci scénářů, které byly určeny pomocí dat z kapitoly 5. Další výhodou scénářové úlohy, bylo nové vyjádření investiční funkce, kopírující reálný vývoj ceny s rostoucí kapacitou. K řešení úlohy byl využit modelovací jazyk GAMS a lokálně konvergentní řešič CONPOPT. Výsledky, získané pomocí výše uvedeného programu, byly následně porovnány s cenou za OB, stanovenou stavební firmou IP Systém a.s. (Kapitola 7.4). V poslední kapitole praktické části, byla aplikována metoda FMEA na bezpečnostní stav ZEVO před a po optimalizaci OB s následným zhodnocením dopadu optimalizace.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Mzp.cz. *Mzp.cz* [online]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/komunalni\\_odpady](https://www.mzp.cz/cz/komunalni_odpady).
- [2] ROGOFF, Marc Jay, Francois SCREVE a Marc Jay ROGOFF. *Waste-to-energy: technologies and project implementation. 2nd ed.* Waltham, MA: William Andrew, 2011. ISBN 978-1-4377-7871-7.
- [3] BROWN, Paul. *How population, landmass, and development interact with culture in the production of waste, Resources, Conservation and Recycling.* Sciencedirect [online]. 2015, (98), [41-54]. ISSN0921-3449. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344915000440?via%3Dihub>.
- [4] REN, Jingzheng, ed. *WASTE-TO-ENERGY MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS FOR SUSTAINABILITY ASSESSMENT AND RANKING.* Hong Kong: Academic Press, 2020. ISBN 9780128166130.
- [5] Skladba KO v ČR. In: *Ekonom.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.ekokom.cz/news/715/212/Skladba-smesneho-komunalniho-odpadu-z-domacnosti-cR>.
- [6] *Energetika.tzb* [online]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>.
- [7] STRAKA, David. *Složení komunálních odpadů.* Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] KALOGIROU, Efstratios N. *Waste-to-energy technologies and global applications.* Boca Raton, FL: CRC Press, 2018. ISBN 978-1138035201.
- [9] ŠOMPLÁK, Radovan. *Využití metod stochastického programování pro hodnocení investic v energetických zdrojích.* Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství.
- [10] ŠOMPLÁK, Radovan. *Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů.* Brno, 2016. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství.
- [11] *Sako.cz.* [online]. Dostupné z: <https://www.sako.cz/>.
- [12] *Termizo a.s.* [online]. Dostupné z: <https://tmz.mvv.cz/>.
- [13] *ZEVO a.s. Praha* [online]. Dostupné z: <https://tmz.mvv.cz/>.
- [14] *ZEVO a.s. Plzeň* [online]. Dostupné z: <https://www.zevoplzen.cz/>.

- [15] HRABEC, Dušan. *MATHEMATICAL PROGRAMS FOR DYNAMIC PRICING - DEMAND BASED MANAGEMENT*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] MING CHOI, Tsan, ed. *Handbook of Newsvendor Problems*. New York: Springer, 2012. ISBN 978-1-4614-3599-0.
- [17] A.V. Hill. *The newsvendor problem*. In: Clamshell Beach Press (published online) (2011), 24 p.
- [18] HRABEC, Dušan. The newsvendor problem with advertising: an overview with extensions. *Rev Manag Sci* [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.1007/s11846-016-0204-1.
- [19] POPELA, Pavel, Michaela, Ulverová, Radovan, Šomplák. *NEW APPLICATIONS OF THE NEWSBOY PROBLEM* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: doi:10.5300/IB/2011-2/164.
- [20] STAMATIS, D. H. *Failure Mode and Effect Analysis*. Second edition. USA: American Society for Quality, 2003. ISBN 0-87389-598-3.
- [21] *Analýza možných způsobů a důsledků závad (FMEA)*. ČR: Česká společnost pro jakost, 2003. ISBN 80-02-01476-6.
- [22] MIKULAK, Raymond J. *The Basics of FMEA*. 2nd Edition. Productivity press, 2008. ISBN 1563273772.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

OH Odpadové Hospodářství

MŽP Ministerstvo životního prostředí

KO Komunální odpad

SKO směsný komunální odpad

OB Odpadní bunkr

ZEVO zařízení pro energetické využití odpadu

MŽP Ministerstvo životního prostředí

NP Newsvendor problem

FMEA failure mode and effect analysis

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Složení SKO. v ČR. za rok 2019 [5].	10
Obrázek 2: Výhřevnost složek KO [7].	11
Obrázek 3: Zjednodušené schéma zpracování odpadu.	12
Obrázek 4: <i>Schéma popisující ZEVO</i> [8].	13
Obrázek 5: Zobrazení účelové funkce[19].	17
Obrázek 6: Boxplot denního návozu/zpracování	20
Obrázek 7: bilance odpadu.	21
Obrázek 8: četnost odstávek.	22
Obrázek 9: naplněnost OB.	23
Obrázek 10: Investiční funkce	32
Obrázek 11: Výpis výsledků v programu GAMS.	33
Obrázek 12: výsledky metody FMEA	39



**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Porovnání kapacit čekých ZEVO. ....	14
Tabulka 2: denní návoz odpadu. ....	20
Tabulka 3: denní zpracování odpadu. ....	21
Tabulka 4: aktiva ZEVO. ....	34
Tabulka 5: hodnocení RPN. ....	35
Tabulka 6: Kvantifikace výskytu poruch. ....	35
Tabulka 7: kvantifikace významu poruch. ....	36
Tabulka 8: kvantifikace kritičnosti poruch. ....	36
Tabulka 9: FMEA pro stav ZEVO (A–A). ....	37
Tabulka 10: Tabulka 10: FMEA pro stav ZEVO po optimalizaci OB. ....	38

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P A: výpočet pro model 1

Příloha P B: výpočet pro model 2

Příloha P C: program na výpočet optima v GAMSU

Příloha P D: Výpočet OB firmou I.P. Systém A.S.

## PŘÍLOHA P A: VÝPOČET PRO MODEL 1

$$\psi(D_{(\varepsilon)}, x) = \begin{cases} I_{(x)} + s[D_{(\varepsilon)} - x] & \text{pro } x < D_{(\varepsilon)} \\ I_{(x)} & \text{pro } x \geq D_{(\varepsilon)} \end{cases}$$

$$\Psi(x) = E[\psi(D_{(\varepsilon)}, x)] = \int_{x < t} [cx + s(t - x)] f(t) dt + \int_{x \geq t} [cx] f(t) dt$$

$$\int_A^x f(t) dt = [F(t)]_A^x = [F(x) - F(A)]$$

$$\int_x^B [t - x] f(t) dt = [(t - x)F(t)]_x^B - \int_x^B F(t) dt =$$

$$= (B - x)F(B) - (x - x)F(x) - \Gamma(B) + \Gamma(x) =$$

$$= B - x - \Gamma(B) + \Gamma(x)$$

$$cx[F(B) - F(x)] + s[B - x - \Gamma(B) + \Gamma(x)] + cx[F(x) - F(A)] =$$

$$= cx + s[B - x - \Gamma(B) + \Gamma(x)] =$$

$$cx - sx + s\Gamma(x)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = c - s + sF(x)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = sf(x)$$

$$F(x^*) = \left( \frac{c - s}{-s} \right)$$

$$x^* = F^{-1} \left( \frac{c - s}{-s} \right)$$

## PŘÍLOHA P B: VÝPOČET PRO MODEL 2

$$D(u, \varepsilon) \equiv d(u) + \varepsilon_a$$

$$z = x - d(u)$$

$$\psi(\varepsilon, x, u) = \begin{cases} kc[z + d(u)] + s[\varepsilon_a - z] & \text{pro } z < \varepsilon_a \\ kc[d(u) + \varepsilon_a] + v[z - \varepsilon_a] & \text{pro } z \geq \varepsilon_a \end{cases}$$

$$\Psi(z) = E[\psi(u, z, t)] = \int_z^B (kc[z + d(u)] + s[t - z])f(t)d(t) +$$

$$+ \int_A^z (kc[d(u) + t] + v[z - t])f(t)d(t)$$

$$\int_z^B (t - z)f(t)dt = [(t - z)F(t)]_z^B - \int_z^B F(t)dt =$$

$$= (B - z)F(B) - (z - z)F(z) - \Gamma(B) + \Gamma(z)$$

$$\int_A^z (t - z)f(t)dt = [(t - z)F(t)]_A^z - \int_A^z F(t)dt =$$

$$= (z - z)F(z) - (A - z)F(A) - \Gamma(z) + \Gamma(A)$$

$$kc[z + d(u)] \cdot [F(B) - F(z)] + s[B - z - \Gamma(B) + \Gamma(z)] +$$

$$+ kc[z + d(u)] \cdot [F(z) - F(A)] + kc[\Gamma(A) - \Gamma(z)] + v[\Gamma(z) - \Gamma(A)] =$$

$$= kc[z + d(u)] \cdot [1 - F(z)] + s[B - z - \Gamma(B) + \Gamma(z)] +$$

$$+ kc[z + d(u)]F(z) + kc[\Gamma(z) - \Gamma(A)] + v[\Gamma(z) - \Gamma(A)] =$$

$$kcz + kc \cdot d(u) + sB - sz - s\Gamma(B) + s\Gamma(z) - kc\Gamma(z) + v\Gamma(z) - v\Gamma(A)$$

$$\frac{\partial \Psi(z, u)}{\partial z} = kc - s + sF(z) - kcF(z) + vF(z)$$

$$z^* \equiv z = F^{-1}\left(\frac{kc - s}{kc - s - v}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi(z, u)}{\partial z^2} = sf(z) - kcf(z) + vf(z)$$

## PŘÍLOHA P C: PROGRAM NA VÝPOČET OPTIMÁLNÍHO ŘEŠENÍ V SOFTWARE GAMS

```
OPTION NLP = CONOPT

SET
J index_prome /1 * 5/;

PARAMETERS
DOS(J) dovoz_odpadu_rk /1 80, 2 85, 3 95,4 100/
PST(J) pravdepodobnost /1 0.1, 2 0.4, 3 0.4,4 0.1/;

SCALAR
S/520000/;
* Pokuta za prevoz 1KT odpadu na skládku;

VARIABLE Z ucelova fce, I investice, PO(J), G(J),NOB(J);
POSITIVE VARIABLE C vysledna kapacita;
EQUATIONS UCSELFCE, INVESTICE,DHS, HHS, PR, OP,PREVOZ,OM;
INVESTICE.. I =E= 800000 * C**0.6;
* investiční funkce, pro spalovnu v KT výsledná kapacita se dále převede na t
PREVOZ(J).. G(J) =E= S * NOB(J);
*vypočet pokuty za prevoz odpadu
PR(J).. PO(J) - NOB(J) =E= C - DOS(J);

OP(J).. PO(J) =G= 0;
OM(J).. NOB(J) =G= 0;
* zajistení že PO a NOB budou větší než 0
DHS.. C =G= 50;
HHS.. C =L= 500;
* Určení hranic pro daný příklad
UCSELFCE.. Z =E= I + SUM (J, (G(J)) * PST(J));
MODEL zjprípád /ALL/;
SOLVE zjprípád MINIMIZING Z USING NLP;
DISPLAY Z.L, C.L, I.L, PO.L, G.L,NOB.L;
```

# PŘÍLOHA P D: VÝPOČET OB FIRMOU IP SYSTÉM A.S.

REKAPITULACE OBJEKTŮ STAVBY A SOUPISŮ PRACÍ			
Kód:	01		
Stavba:	Zřízení podzemní nádrže		
Místo:		Datum:	6. 4. 2021
Zadavatel:		Projektant:	
Zhotovitel:		Zpracovatel:	
Kód	Popis	Cena bez DPH [CZK]	Cena s DPH [CZK]
<b>1) Náklady z rozpočtů</b>		<b>10 170 263,04</b>	<b>12 306 018,28</b>
01	Stavební část	10 170 263,04	12 306 018,28
<b>2) Ostatní náklady ze souhrnného listu</b>		<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>Celkové náklady za stavbu 1) + 2)</b>		<b>10 170 263,04</b>	<b>12 306 018,28</b>

SOUPIS PRACÍ							
Stavba:		Zřízení podzemní nádrže					
Objekt:		<b>01 - Stavební část</b>					
Místo:				Datum:		6. 4. 2021	
Zadavatel:				Projektant:			
Zhotovitel:				Zpracovatel:			
TV	Kód	Popis	Množst	J.cena [CZK]	Cena celkem [CZK]		
<b>Náklady soupisu celkem</b>					<b>10 170 263,04</b>		
D	HSV	Práce a dodávky HSV			10 170 263,04		
D	1	Zemní práce			4 890 806,50		
1	K	111111101 Odstranění travin v rovině nebo ve svahu do 1:5	m2	2 000,000	9,24	18 480,00	
		60*40		2 000,000			
		30*24*0,5		360,000			
2	K	115101201 Čerpání vody na dopravní výšku do 10 m	hod	360,000	74,90	26 964,00	
		průměrný přítok do 500 l/min					
		30*24*0,5		360,000			
3	K	115101301 Pohotovost čerpací soupravy pro dopravní výšku	hod	360,000	43,90	15 804,00	
		do 10 m přítok do 500 l/min					
		30*24*0,5		360,000			
4	K	121151124 Sejmутi ornice plochy přes 500 m2 tl vrstvy do 250	m2	1 200,000	14,60	17 520,00	
		mm strojně					
		40*30		1 200,000			
5	K	131451207 Modulen jam zapazenychn v normine trny	m3	6 602,500	138,00	911 145,00	
		těžitelnosti II, skupiny 5 objem přes 3000 m3					
		35*25*5,5+(40+30)*2*5,5*5*0,5+3*20*5,5*0,5+1200*0,25		6 602,500			
6	K	161151114 Svisle přemístění výkopku z norminy trny	m3	12 877,500	35,00	450 712,50	
		těžitelnosti II, skupiny 4 a 5 hl výkopu přes 8 do 12					
7	K	162351123 Vodorovně přemístění do 500 m výkopku/sypaniny	m3	19 427,000	54,00	1 049 058,00	
		z hornin třídy těžitelnosti II, skupiny 4 a 5					
		12250+1200*0,25+6877,55		13 152,550			
8	K	162751139 Příplatek k vodorovnému přemístění	m3	30 000,000	10,00	300 000,00	
		výkopku/sypaniny z horniny třídy těžitelnosti II,					
		skupiny 4 a 5 ZKD 1000 m přes 10000 m					
		6000*5		30 000,000			
9	K	167151112 Nakládání výkopku z hornin třídy těžitelnosti II,	m3	6 877,500	60,70	417 464,25	
		skupiny 4 a 5 přes 100 m3					
10	K	171201221 Poplatek za uložení na skládce (skládkovně)	t	5 400,000	90,00	486 000,00	
		zeminy a kamení kód odpadu 17 05 04					
		3000*1,8		5 400,000			
11	K	171251201 Uložení sypaniny na skládky nebo meziskládky	m3	12 877,500	18,50	238 233,75	
12	K	174151101 Zásyp jam, šachet rýh nebo kolem objektů	m3	6 877,500	133,00	914 707,50	
		sypaninou se zhuťněním					
13	K	181351114 Rozprostření ornice tl vrstvy do 250 mm pl přes	m2	1 200,000	19,40	23 280,00	
		500 m2 v rovině nebo ve svahu do 1:5 strojně					

13	K	181351114	Rozprostření ornice tl vrstvy do 250 mm pl přes 500 m2 v rovině nebo ve svahu do 1:5 strojně	m2	1 200,000	19,40	23 280,00
14	K	181951114	Úprava pláně v hornině třídy těžitelosti II, skupiny 4 a 5 se zhutněním strojně	m2	875,000	24,50	21 437,50
	W		35*25		875,000		
	D	2	Zakládání				3 469 981,00
15	K	271532212	Podsyp pod základové konstrukce se zhutněním z hrubého kameniva frakce 16 až 32 mm	m3	437,500	750,00	328 125,00
	W		35*25*0,5		437,500		
16	K	271562211	Podsyp pod základové konstrukce se zhutněním z drobného kameniva frakce 0 až 4 mm	m3	26,250	1 080,00	28 350,00
	W		25*35*0,03		26,250		
17	K	273313511	Základové desky z betonu tř. C 12/15	m3	62,525	2 240,00	140 056,00
	W		30,5*20,5*0,1		62,525		
18	K	273323611	Základové desky ze ŽB pro konstrukce bílých van tř. C 30/37	m3	180,000	2 450,00	441 000,00
	W		20*30*0,3		180,000		
19	K	273351121	Zřízení bednění základových desek	m2	50,000	401,00	20 050,00
	W		(20+30)*2*0,5		50,000		
20	K	273351122	Odstranění bednění základových desek	m2	50,000	108,00	5 400,00
21	K	273361821	Výztuž základových desek betonářskou ocelí TU 505, Rp	t	18,000	30 000,00	540 000,00
	W		100*180*0,001		18,000		
22	K	279323112	Základová zeď ze ŽB pro konstrukce bílých van tř. C 30/37	m3	150,000	2 680,00	402 000,00
	W		(20+30)*2*0,3*5		150,000		
23	K	279351121	Zřízení oboustranného bednění základových zdí	m2	1 000,000	431,00	431 000,00
	W		(30+20)*2*5*2		1 000,000		
24	K	279351122	Odstranění oboustranného bednění základových zdí	m2	2 000,000	117,00	234 000,00
25	K	279361821	Výztuž základových zdí nosných betonářskou ocelí 10 505	t	30,000	30 000,00	900 000,00
	W		100*300*0,001		30,000		
	D	4	Vodorovné konstrukce				1 624 020,00
26	K	411321616	Stropy deskové ze ŽB tř. C 30/37	m3	180,000	2 980,00	536 400,00
	W		20*30*0,3		180,000		
27	K	411351021	Zřízení bednění stropů deskových tl do 50 cm bez podpěrné kce	m2	600,000	419,00	251 400,00
	W		20*30		600,000		
28	K	411351022	Odstranění bednění stropů deskových tl do 50 cm bez podpěrné kce	m2	600,000	128,00	76 800,00
29	K	411354337	Zřízení podpěrné konstrukce stropů výšky do 10 m tl do 50 cm	m2	600,000	278,00	166 800,00
30	K	411354338	Odstranění podpěrné konstrukce stropů výšky do 10 m tl do 50 cm	m2	600,000	87,70	52 620,00
31	K	411361821	Výztuž stropů betonářskou ocelí 10 505	t	18,000	30 000,00	540 000,00
	W		100*180*0,001		18,000		
	D	9	Ostatní konstrukce a práce, bourání				85 800,00
32	K	953334118	Bobtnavý pásek do pracovních spar betonových kci bentonitový 20 x 15 mm	m	300,000	286,00	85 800,00
	D	998	Přesun hmot				99 655,54
33	K	998012022	Přesun hmot pro budovy monolitické v do 12 m	t	2 847,301	35,00	99 655,54