



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

EFEKTIVNÍ PLÁNOVÁNÍ INVESTIC DO TECHNOLOGIÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ

EFFECTIVE INVESTMENT PLANNING IN WASTE-TO-ENERGY SYSTEMS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Radovan Šomplák

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

BRNO 2016

Abstrakt

Disertační práce se zabývá aplikací simulačních a optimalizačních metod v oblasti energetického využití odpadů. V úvodu práce je popsán současný stav v oblasti odpadového hospodářství v EU se zaměřením na ČR. Následující kapitola pojednává o hodnotících kritériích investičních záměrů a základních principech stochastického programování. Jádrem práce jsou matematické modely zaměřené na plánování a provoz jednotlivých zařízení a problematiku spojenou se svozem odpadu. Dopravní úloha dává do souvislostí všechny uvažované projekty v hodnoceném zájmovém území a je možné díky ní simulovat toky odpadu mezi producenty a zpracovateli. Přístup je demonstrován na pěti případových studiích. V prvních třech studiích byly uvedeny výpočty pro potenciálního investora. Hlavním výstupem bylo určení míry atraktivity investice a identifikace největších rizik. Další případová studie byla věnována analýze z pohledu statní koncepce. V poslední případové studii je detailně analyzována problematika nakládání s odpadem z pohledu producentů.

Klíčová slova

Zařízení EVO, odpadové hospodářství, stochastické programování, optimalizace, NERUDA

Abstract

PhD thesis deals with the application of the simulation and optimization methods in the waste-to-energy field. An introduction describes the current state of the waste management in the EU with the focus on the Czech Republic. In the following chapter the evaluation criteria for investment intentions and the basic principles of stochastic programming are discussed. The core of the work lays in the mathematical models for the planning and operation of the process plants as well as in the mathematical models for the waste collection. The transportation problem involves all considered technological elements and therefore it is possible to simulate the waste streams between the producers and processors. This approach is demonstrated with five case studies. In the first three studies the calculations for the potential investor are presented. The main outcome of these case studies is the determination of the level of attractiveness of investment and the identification the greatest risks. Another case study is devoted to an analysis with the focus on perspective of government policies and in the last case study the issue of the waste management is analyzed in detail from the perspective of the waste producers. Developed computational tools are flexible and can be further developed and adapted based on the objectives of the specific tasks.

Keywords

Waste-to-energy plant, waste management, stochastic programming, optimization, NERUDA

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c. za poskytnutí kvalitních podmínek v průběhu studia. Dále děkuji Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky v oblastech energetiky, teplárenství a odpadovém hospodářství. Panu RNDr. Pavlu Popelovi, Ph.D. děkuji za odborné konzultace v oblasti matematického programování. Dále bych rád poděkoval projektu TAČR č. TE02000236 "Waste-to-Energy (WTE) Competence Centre" (WtECC), díky kterému bylo možné rozvíjet související problémy s mojí disertační prací a vyvíjet potřebné výpočetní nástroje.

Bibliografická citace práce

ŠOMPLÁK, R. *Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 108 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Petra Stehlíka, CSc., dr. h. c., na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 3. února 2016

.....
Ing. Radovan Šomplák

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	5
1. Motivace, úvod	6
1.1 Situace v EU	6
1.2 Situace v České republice	11
1.3 Cíle práce	13
2. Úvod do ekonomického hodnocení projektů a přínos stochastického programování	14
3. Výpočtový nástroj pro návrh klíčových prvků zařízení EVO	17
3.1 Technicko-ekonomický model zařízení EVO.....	17
3.2 Odhad investičních nákladů jednotek s kapacitou nad 100 kt/r.....	19
3.3 Matematický model	22
4. Výpočtový nástroj <i>NERUDA</i> – logistický problém plánování v oblasti odpadového hospodářství.....	25
4.1 Hlavní myšlenka výpočtového nástroje <i>NERUDA</i>	26
4.2 Matematický model nástroje <i>NERUDA</i>	26
4.3 Princip výpočtu – zjednodušená úloha	29
4.4 Vstupy a okrajové podmínky výpočtu pro aplikaci modelu na území ČR	31
4.4.1 Silniční a železniční infrastruktura	32
4.4.2 Zpracovatelský potenciál SKO v Německu a Rakousku	34
4.4.3 Produkce spalitelných odpadů	36
4.4.4 Dopravní náklady.....	40
4.5 Linearizace úlohy.....	41
4.6 Oblasti použití nástroje <i>NERUDA</i>	43
5. Výpočtový nástroj <i>PIGEON</i>	44
5.1 Matematický model nástroje <i>PIGEON</i>	49
5.2 Zjednodušený příklad	52
5.3 Časová náročnost výpočetních nástrojů.....	57
6. Postprocessing – zpracování výsledků scénářových úloh	57
6.1 Shluková analýza	58
6.2 Metoda <i>k</i> -průměrů.....	60
7. Aplikace komplexu výpočtových nástrojů pro koncepční návrh zařízení EVO.....	61
7.1 Vyhodnocení lokalit pro výstavbu zařízení EVO – z pohledu investora.....	64
7.1.1 Úvod k případové studii.....	64

7.1.2 Výpočty a simulace Monte Carlo	65
7.1.3 Vyhodnocení výsledků	66
7.2 Analýza rizik pro konkrétní zařízení EVO v jeho koncepční fázi vývoje – z pohledu investora.....	68
7.2.1 Simulační analýza pro hodnocení faktoru dostupnosti odpadu	68
7.2.2 Komplexní analýza rizika	73
7.3 Návrh klíčových prvků zařízení EVO – z pohledu investora	75
7.4 Modelování vlivu vývoje legislativy na systém nakládání s odpady – z pohledu státu .	81
7.5 Analýza zaměřená na producenty odpadu – případová studie nástroje <i>PIGEON</i>	87
7.5.1 Okrajové podmínky výpočtu	87
7.5.2 Ukázka shlukové analýzy na výstupních datech z nástroje <i>NERUDA</i>	88
7.5.3 Výsledky testovacích výpočtů nástrojem <i>PIGEON</i> pro jeden shluk	89
7.5.4 Výsledky testovacích výpočtů nástrojem <i>PIGEON</i> pro více shluků	91
8. Další vývoj výpočetních nástrojů	92
9. Závěr a návrh dalšího postupu	95
Literatura	97
Seznam použitých symbolů a zkratk	103

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Vývoj produkce a zpracování KO v EU [1]</i>	6
<i>Obr. 2: Nakládání s KO v roce 2012 v EU 28, podle země a způsobu [2]</i>	7
<i>Obr. 3: Dopady skládkovacího poplatku (příp. zákazu skládkování) a spalovací daně na tok odpadu mezi klíčovými prvky systému zpracování.</i>	8
<i>Obr. 4: Rok zavedení poplatku za skládkování v zemích EU [4]</i>	9
<i>Obr. 5: Náklady na skládkování odpadu v EU [4]</i>	9
<i>Obr. 6: Porovnání celkové hmotnostní bilance pro zařízení EVO a MBÚ, vychází z [16]</i>	11
<i>Obr. 7: Možné rozmístění zpracovatelských kapacit pro naplnění závazku ČR v roce 2020 [20]</i>	13
<i>Obr. 8: Ukázka finančního toku pro zařízení EVO průběhu životnosti [23]</i>	14
<i>Obr. 9: Závislost požadované ziskovosti investice na míře rizika β</i>	15
<i>Obr. 10: Schéma dvoustupňového stochastického programování</i>	16
<i>Obr. 11: Schéma uvažované technologie EVO</i>	17
<i>Obr. 12: Příklad struktury příjmů (vlevo) a výdajů (vpravo) [27]</i>	18
<i>Obr. 13: Intervalový pás pro cenu na bráně v závislosti na kapacitě</i>	19
<i>Obr. 14: Závislost počtu linek na kapacitě [29]</i>	21
<i>Obr. 15: Závislost investičních nákladů na kapacitě</i>	21
<i>Obr. 16: Porovnání modelu investičních nákladů s reálnými projekty</i>	22
<i>Obr. 17: Hlavní myšlenka nového výpočtového nástroje pro podporu plánování zařízení v oblasti OH</i>	26
<i>Obr. 18: Dopravní síť zjednodušené úlohy</i>	30
<i>Obr. 19: Grafická reprezentace výsledků zjednodušené optimalizační úlohy</i>	31
<i>Obr. 20: Rozdělení území do uzlů, dopravní (silniční) infrastruktura modelu a klíčové prvky systému</i>	33
<i>Obr. 21: Železniční síť ČR a spojení se zařízeními EVO v sousedních státech</i>	34
<i>Obr. 22: Výhled produkce odpadů a zpracovatelských kapacit v regionu východního Německa [35]</i>	35
<i>Obr. 23: Výhled produkce odpadů a zpracovatelských kapacit v jižním Německu [35]</i>	36
<i>Obr. 24: Podíly zbytkových spalitelných odpadů na celkové produkci v roce 2012</i>	37
<i>Obr. 25: Složení zbytkových spalitelných odpadů skládkovaných v roce 2012</i>	38
<i>Obr. 26: Vývoj produkce odpadů vhodných pro energetické využití</i>	39
<i>Obr. 27: Měrná produkce odpadů vhodných pro energetické využití [kg/ob. a rok]</i>	39
<i>Obr. 28: Produkce odpadů vhodných pro energetické využití [kt/r]</i>	40
<i>Obr. 29: Závislost jednotkové ceny za přepravu na přepravní vzdálenosti [37]</i>	40
<i>Obr. 30: Cena na bráně v závislosti na kapacitě a celkové náklady za zpracování odpadu v závislosti na množství odpadu</i>	41
<i>Obr. 31: Linearizace úlohy pomocí proložení nelineární funkce po částech lineární křivkou</i>	42
<i>Obr. 32: NERUDA - jeden nástroj, mnoho modifikací a způsobů prezentace výsledků dle potřeb zadavatele</i>	44
<i>Obr. 33: Ukázka uvažovaných typů sítí</i>	45
<i>Obr. 34: Výpočtová náročnost v závislosti na počtu uzlů – model bez železnice [51]</i>	45
<i>Obr. 35: Výpočtová náročnost v závislosti na počtu uzlů – model s železnicí [51]</i>	46
<i>Obr. 36: Dopravní síť motivačního příkladu [52]</i>	47

<i>Obr. 37: Síť zjednodušeného příkladu</i>	53
<i>Obr. 38: Dendrogram pro jednoduché spojení</i>	59
<i>Obr. 39: Dendrogram pro úplné spojení</i>	59
<i>Obr. 40: Příklad funkce ceny na bráně závisle na kapacitě vytvořené pro jeden konkrétní projekt.....</i>	66
<i>Obr. 41: Analýza spolehlivosti naplnění kapacity u dvou projektů v různých lokalitách a pro dva různé scénáře budoucího vývoje legislativy</i>	67
<i>Obr. 42: Analýza spolehlivosti naplnění kapacity u dvou projektů v rámci různých sazeb skládkovacího poplatku</i>	67
<i>Obr. 43: Vizualizace výsledků modelu pro jeden konkrétní scénář dopravy - vysoký skládkovací poplatek, energie vyrobená v zařízení EVO je podporována dotacemi</i>	68
<i>Obr. 44: Princip nástroje NERUDA</i>	69
<i>Obr. 45: Závislost WAF na referenční kapacitě C_{REF}.....</i>	71
<i>Obr. 46: Histogram dostupnosti odpadu pro IRR 10 – 12 %</i>	72
<i>Obr. 47: Histogram dostupnosti odpadu pro IRR 8 – 10 %</i>	72
<i>Obr. 48: Závislost WAF na skládkovacím poplatku.....</i>	73
<i>Obr. 49: Příklad výsledků analýzy rizik - grafické znázornění</i>	74
<i>Obr. 50: Význam rizikových faktorů ve vztahu ke změnám ceny na bráně</i>	75
<i>Obr. 51: Závislost ceny na bráně na kapacitě zařízení EVO</i>	76
<i>Obr. 52: Základní scénář vývoje ceny tepla a ukázka tří náhodně vygenerovaných scénářů vývoje.....</i>	77
<i>Obr. 53: Histogram optimálních kapacit</i>	79
<i>Obr. 54. Histogram kritéria IRR</i>	79
<i>Obr. 55: Hraniční scénáře pro vývoj produkce KO vhodného pro energetické využití.....</i>	81
<i>Obr. 56: Vývoj skládkovacího poplatku pro ukázkový příklad</i>	83
<i>Obr. 57: Způsob zpracování odpadu – průměrný stav.....</i>	84
<i>Obr. 58: Způsob zpracování odpadu v procentech – průměrný stav</i>	84
<i>Obr. 59: Histogram množství skládkovaného odpadu v roce 2021 při skládkovacím poplatku 1600 Kč/t [kt/r].....</i>	85
<i>Obr. 60: Vyhodnocení množství odpadu odstraněno skládkováním</i>	85
<i>Obr. 61: Částka vybraná ze skládkovacího poplatku v daném roce</i>	86
<i>Obr. 62: Částka vybrána ze skládkovacího poplatku kumulativně</i>	86
<i>Obr. 63: Vývoj skládkovacího poplatku ukázkového příkladu s označeným rokem pro následnou analýzu</i>	88
<i>Obr. 64: Variabilita celkových nákladů na zpracování SKO pro ORP v ČR pro jeden shluk (možný scénář vývoje)</i>	90
<i>Obr. 65: Histogram celkových nákladů na zpracování SKO v ORP Nové Město na Moravě v roce 2025</i>	91
<i>Obr. 66: Průměrné náklady na zpracování SKO pro ORP v ČR.....</i>	91
<i>Obr. 67: Směrodatná odchylka nákladů na zpracování SKO pro ORP v ČR.....</i>	92
<i>Obr. 70: podkladová mapa pro výpočet NERUDA EU.....</i>	93
<i>Obr. 71: Tok SKO dle zpracování v závislosti na významu environmentálního dopadu [84].</i>	94

Seznam tabulek

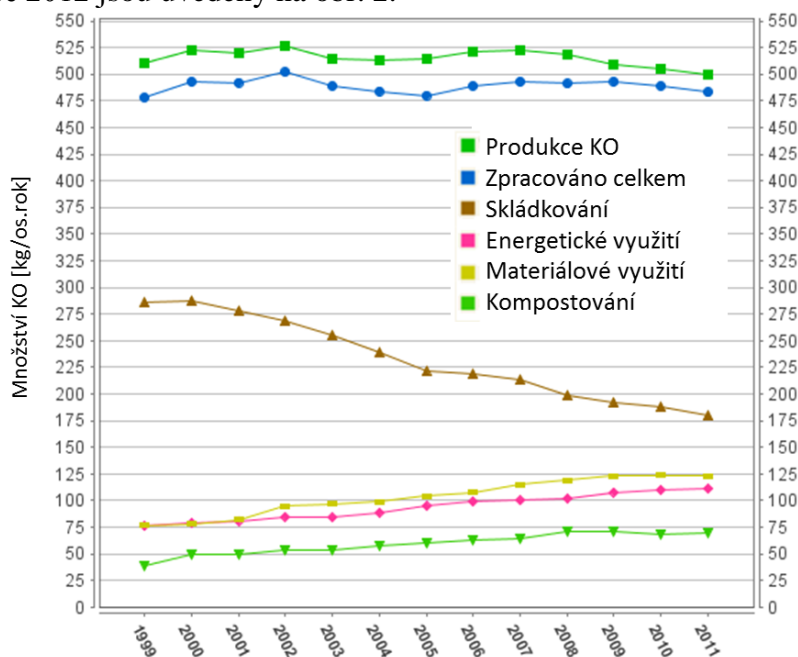
<i>Tab. 1: Odhad investičních nákladů pro různý počet zpracovatelských linek</i>	20
<i>Tab. 2: Produkce odpadu uvažovaná v zjednodušené úloze</i>	30
<i>Tab. 3: Definice dopravní sítě pro zjednodušenou úlohu – matice vzdáleností</i>	30
<i>Tab. 4: Výsledky zjednodušené optimalizační úlohy</i>	31
<i>Tab. 5: Produkce odpadů v jednotlivých obcích zjednodušené úlohy</i>	53
<i>Tab. 6: Množství odpadu tekoucí po silničních hranách</i>	53
<i>Tab. 7: Výsledky pro tok SKO po silnici mezi jednotlivými hranami [kt]</i>	54
<i>Tab. 8: Výsledky pro tok LF po silnici mezi jednotlivými hranami [kt]</i>	54
<i>Tab. 9: Výsledky pro tok slisovaného SKO po silnici mezi jednotlivými hranami [kt]</i>	54
<i>Tab. 10: Výsledky toku SKO po silnici mezi jednotlivými uzly [kt]</i>	54
<i>Tab. 11: Výsledky toku LF po silnici mezi jednotlivými uzly [kt]</i>	55
<i>Tab. 12: Výsledky toku slisovaného SKO po silnici mezi jednotlivými uzly [kt]</i>	55
<i>Tab. 13: Výsledky toku SKO po železnici mezi jednotlivými uzly [kt]</i>	55
<i>Tab. 14: Celkové a jednotkové ceny pro uvažované obce v zjednodušené úloze se stejnými vahami pro obce</i>	55
<i>Tab. 15: Celkové a jednotkové ceny pro uvažované obce v zjednodušené úloze s rozdílnými vahami pro obce</i>	56
<i>Tab. 16: Časová náročnost popisovaných výpočetních nástrojů</i>	57
<i>Tab. 17: Hlavní výstupy z úvodní studie a studie proveditelnosti</i>	62
<i>Tab. 18: Hodnoty spolehlivosti pro projekty s kapacitou uvažovanou v konceptu studie [20] (scénář SC2)</i>	68
<i>Tab. 19: Scénáře vývoje poptávky po teple (SCZT)</i>	77
<i>Tab. 20: Hodnota poptávek po teple v průběhu roku</i>	78
<i>Tab. 21: Hlavní vstupy/výstupy optimalizační úlohy</i>	80
<i>Tab. 22: Počty prvků ve shlucích</i>	88
<i>Tab. 23: Vzdálenost prvků od centroidu shluku 15</i>	89

1. Motivace, úvod

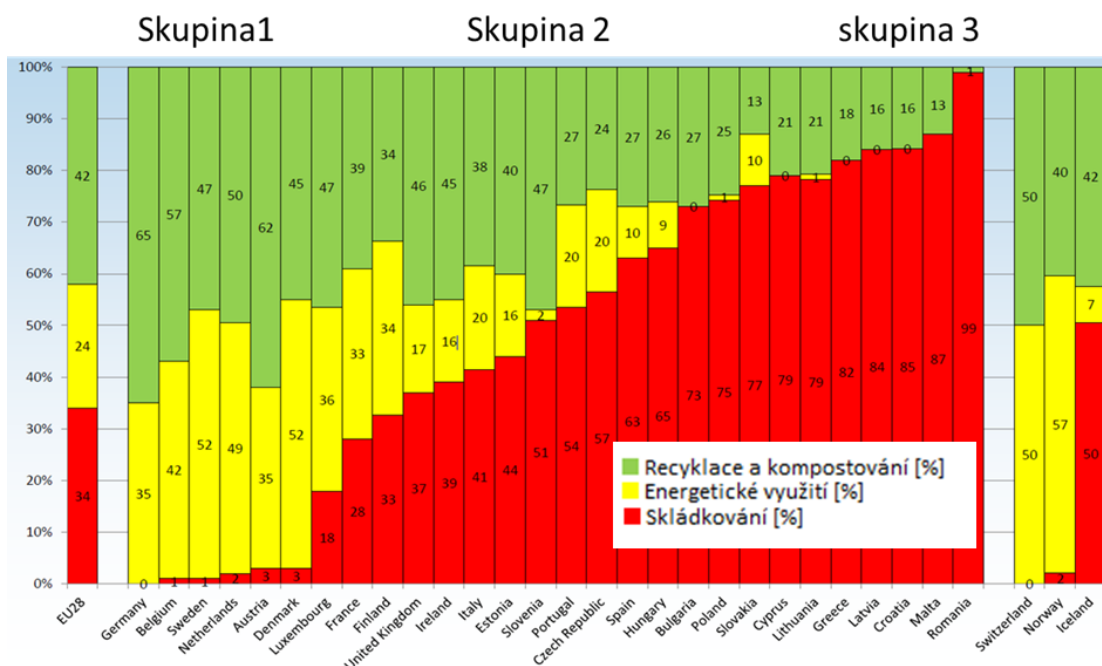
Tato práce se zabývá otázkou plánování v oblasti odpadového hospodářství (OH). Plánováním je myšlen návrh zpracovatelských kapacit a optimalizace toku odpadu od producenta ke zpracovateli. Jednotlivé členské státy Evropské unie (EU) se zavázaly ke snížení poměru odpadů ukládaných na skládky. Současně je požadováno, aby zpracování bylo prováděno co nejefektivnějším způsobem. Tento požadavek je zakotven ve směrnici 2008/98/ES o odpadech a hierarchii nakládání s nimi. Předcházení vzniku odpadů je prioritou této směrnice. Dalším stupněm, který by měl být podporován, je opětovné použití některých výrobků. Materiálové využití je na třetí úrovni v hierarchii nakládání s odpady popsán touto směrnicí. Pokud jsou plně využity všechny výše zmíněné úrovně nakládání s odpady, využití energie z odpadu by pak měla být dána přednost před jeho pouhou likvidací, např. skládkováním nebo spalováním, která nemá energetické využití.

1.1 Situace v EU

V následujícím textu je popsána současná situace nakládání s komunálním odpadem (KO) v EU. Z hlediska evidence odpadů je KO chápán v rozšířené podobě jako „Odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů, včetně složek odděleného sběru“. Podmnožinou KO je směsný komunální odpad (SKO). Jedná se o zbytkový odpad po vyřízení všech využitelných frakcí z KO. Tento typ odpadu je v rámci popsání hierarchie nakládání s odpadem vhodný pro energetické využití. Jelikož míra separace využitelných složek KO není dokonalá, obsahuje SKO stále frakce, které je možné materiálově využít. Jedním z příkladů je biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO), kterému se bude věnovat text dále. Graf na obr. 1 ukazuje vývoj produkce a zpracování KO v 27 členských státech EU. Průměrná produkce v posledních desíti letech stagnuje, až mírně klesá. Současná průměrná produkce odpadu je mírně pod 500 kg na obyvatele a rok (platí pro rok 2013). Je možné si také všimnout progresivní tendence preferovat materiálové a energetické využití před skládkováním [1]. Nejnovější údaje o podílu jednotlivých způsobů zpracování KO (recyklace, energetické využití, kompostování, skládkování) v členských státech EU v roce 2012 jsou uvedeny na obr. 2.



Obr. 1: Vývoj produkce a zpracování KO v EU [1]



Obr. 2: Nakládání s KO v roce 2012 v EU 28, podle země a způsobu [2]

Obr. 2 jasně ukazuje, že současná situace OH se v EU mezi jednotlivými zeměmi značně liší. Je možné rozlišit tři skupiny zemí podle způsobu nakládání s KO. Přesto, nelze jednoznačně určit hranici mezi jednotlivými skupinami.

Skupina 1 (obr. 2 vlevo) – zde můžeme identifikovat země s dobře vyvinutým OH, kde na skládky míří jen velmi malé množství KO. Většina KO je využito materiálově. Tyto úspěšné země se zaměřují na sofistikovaný a efektivní sběr odpadů, který zahrnuje desítky recyklovatelných frakcí. Množství zbytkového odpadu, který již nelze recyklovat, je významně redukováno. Skládkování BRKO je zakázáno, proto se neskládkuje neupravený SKO, který BRKO obsahuje. Většina jeho množství je energeticky využito. Celkové množství energeticky využitého KO je vysoké, pohybuje se v rozmezí od 30 do 40 %. Zařízení pro energetické využití odpadu (EVO) proto hrají důležitou roli v OH těchto zemí. Podpora recyklace je dále posílena spalovací daní (viz obr. 3). Politika prevence vzniku odpadu v kombinaci s demografickým vývojem může vytvářet nadbytečné kapacity pro zpracování odpadu v následujících letech, proto vzniká otázka, zda intenzivní recyklace je v budoucnosti udržitelná [3].

Skupina 2 (obr. 2 uprostřed) – v této skupině jsou země, kde jsou změny směrem k udržitelnějšímu OH ve vývoji. Základní legislativa je již nastavena a konkrétní kroky se provádí v rámci plánů odpadového hospodářství (POH). K dispozici je dostatečný potenciál pro zpracování, ale bohužel, zpracovatelské kapacity vyššího stupně hierarchie nakládání s odpady obvykle chybí. Většina KO s velkým podílem biologicky rozložitelného odpadu se stále ukládá na skládkách. V těchto zemích je vhodné před úplným zákazem skládkování zavést nejdříve zdanění odpadů mířících na skládky. Tím vzniká prostředí, které umožňuje pozvolně část odpadu přeměrovat k efektivnějšímu způsobu nakládání. To je zajištěno postupným vybudováním potřebné zpracovatelské kapacity (obr. 3). Země v této skupině již mají zkušenosti s energetickým zpracováním odpadu. Nicméně materiálové využití je nedostatečné a v této oblasti existuje značný potenciál pro další zlepšení. Celkově je v těchto zemích více projektů EVO, které jsou připravovány, některé jsou již uvedeny do provozu

nebo mají potvrzeno stavební povolení. Velká Británie může sloužit jako příklad země na hranici mezi první a druhou skupinou.

Skupina 3 (obr. 2 vpravo) – země, které čekají na transformaci legislativních podmínek OH. Skládkování zde není nijak omezeno a pouze nízké množství odpadu se recykluje. V těchto zemích nejsou dostatečně nastaveny žádné environmentální postupy v rámci nakládání s KO.

Více informací o aktuálním stavu v jednotlivých členských státech EU je možné nalézt ve studii [4]. Jejím cílem je vyhodnotit členské státy, z hlediska jejich souladu s výše uvedenou hierarchií. Dále se zabývá existencí a účinností ekonomických nástrojů pro podporu OH, plánovaným počtem projektů EVO a fází jejich vývoje a splnění cílů snížit množství BRKO ukládaného na skládky.

Jak bylo uvedeno výše, jedním z klíčových ekonomických nástrojů řízení OH směrem k jeho zefektivnění je skládkovací poplatek nebo úplný zákaz skládkování neupravených odpadů. Tato omezení ovlivňují ekonomiku klíčových prvků systému (skládky, zařízení EVO, mechanicko-biologická úpravna – MBÚ, tříděný sběr pro následné materiálové využití), a tím i tok odpadu. Tento vliv je shrnut v grafické formě na obr. 3.

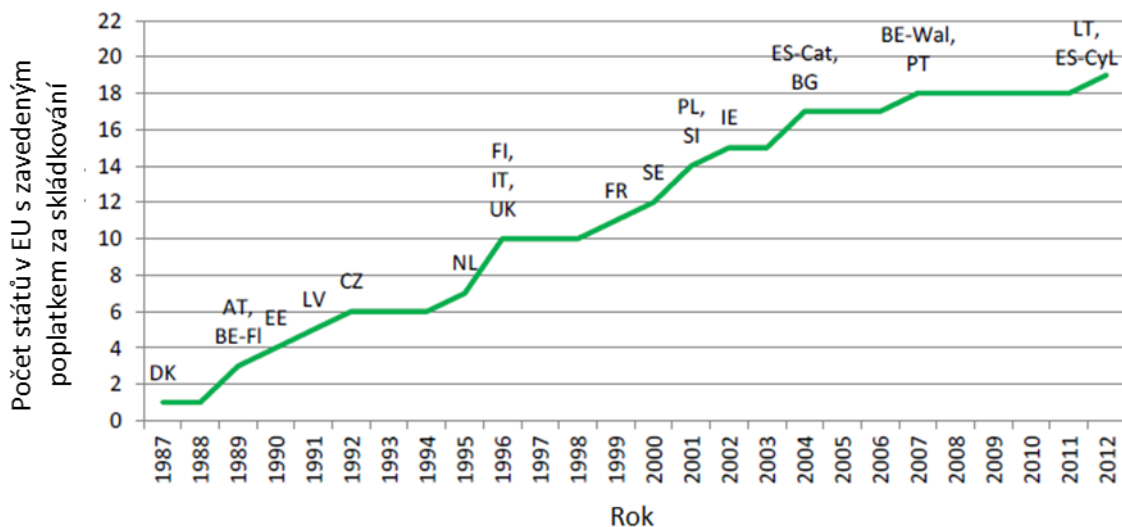


Obr. 3: Dopady skládkovacího poplatku (příp. zákazu skládkování) a spalovací daně na tok odpadu mezi klíčovými prvky systému zpracování.

V souladu s uvedenou hierarchií jsou voleny poplatky a ekologické daně pro dané typy zpracování (např. skládkovací poplatek), viz obr. 3. Tím vzniká ekonomické prostředí, které upřednostňuje způsoby zpracování ve vyšších úrovních hierarchie. Další možností, jak podporovat žádoucí způsoby zpracování odpadu, jsou investiční a provozní dotace.

Výše poplatku za skládkování se v jednotlivých zemích liší. Poplatky jsou zpravidla zaváděny postupně, aby byl dostačující čas pro plynulý přechod na jiný způsob zpracování odpadu. Na obr. 4 jsou označeny země EU, ve kterých je již poplatek za skládkování v platnosti. V ČR má skládkovací daň dvě složky (skládkovací poplatek – 0 Kč/t, kompenzační poplatek – 500 Kč/t,

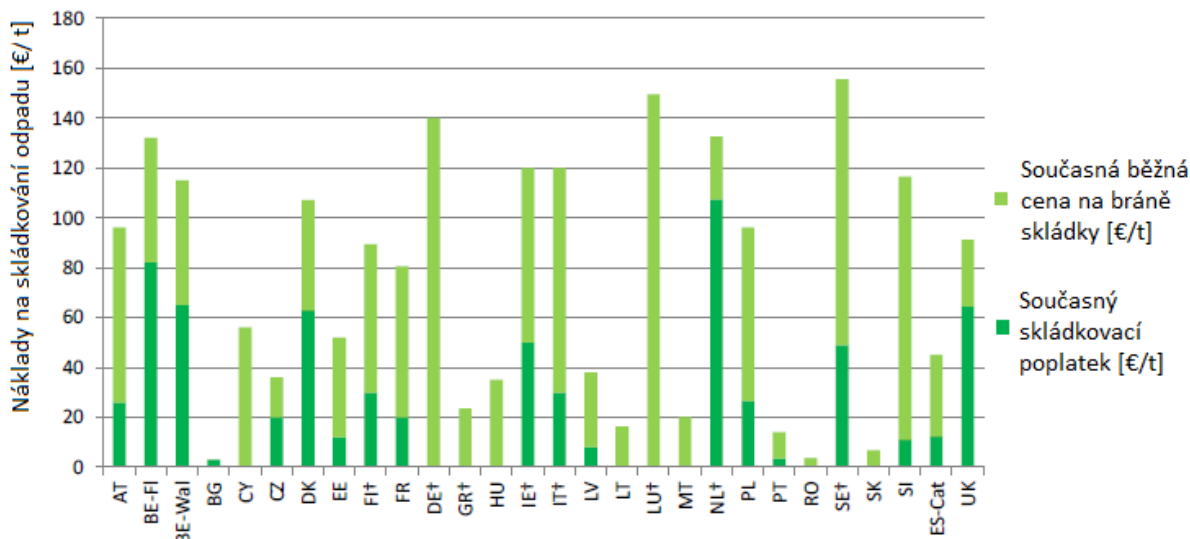
platí pro rok 2015). Dále v textu bude skládkovacím poplatkem myšlen součet těchto složek. Jako doplňková informace v obr. 4 je uveden rok jeho zavedení.



(BE-FI = Flanders, Belgium; ES-Cat = Catalonia, Spain; BE-Wal = Wallonia, Belgium, ES-CyL = Castilla y Leon, Spain)

Obr. 4: Rok zavedení poplatku za skládkování v zemích EU [4]

Aktuální náklady spojené se skládkováním odpadu v zemích EU jsou uvedeny na obr. 5. Uvedené hodnoty reprezentují obvyklou cenovou úroveň. V některých zemích se mohou náklady regionálně výrazně lišit (např. v Itálii a Španělsku se skládkovací poplatek stanovuje na regionální úrovni).



Obr. 5: Náklady na skládkování odpadu v EU [4]

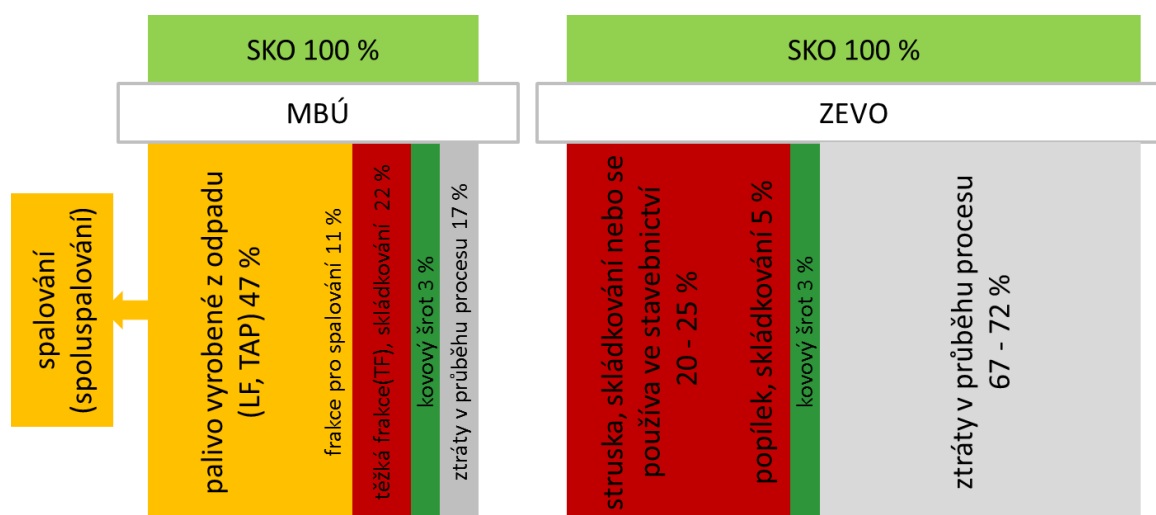
Obecně vztah mezi cenou za zpracování odpadů, skládkováním a recyklací je řešen v [5]. Další poznámky k problematice lze nalézt v dokumentu [6], kde je vyhodnocen dopad zavedení těchto daňových zátěží pro přeshraniční přepravu odpadů. Nový fenomén, nadbytečné kapacity u zařízeních EVO v některých zemích, v doprovodu s právními předpisy umožňující přeshraniční přepravu odpadů a různé ceny za zpracování, vytvořil konkurenční prostředí napříč státy v EU. Ve Velké Británii bylo doposud nedostatek kapacit pro energetické využití spalitelných odpadů (vhodných pro energetické využití), avšak podle

zprávy [7] jsou všechny v současnosti plánované projekty ve Velké Británii, s kapacitou okolo 25 tis. kt/r, úspěšně realizovány. Tím se omezí export spalitelných odpadů z Velké Británie. Z důvodu nižšího importu a snižování produkce spalitelných odpadů v Německu se očekává, že v roce 2020 bude nadbytečná zpracovatelská kapacita okolo 3 tis. kt/r [8]. Z těchto důvodů se dovoz odpadu do zemí, které trpí nadbytečnou kapacitou, stal důležitým tématem. Případný dovoz je podmíněn splněním minimální účinnosti energetického využití v cílové zemi. Zařízení EVO musí být provozováno v souladu s faktorem R1 (energetická účinnost) stanoveným právními předpisy EU. Analýzu a srovnání R1 faktorů lze nalézt v [9] a [10]. Článek [11] hodnotí jednotlivé systémy u zařízeních EVO, pokud jde o využití energie a jejich dopad na různé provozní režimy v návaznosti na hodnotu R1. V článku [12] bylo dokázáno, že energie vyrobená v zařízeních EVO přispívá k úsporám primární energie (ÚPE), stejně jako energie z biomasy, zatímco produkce emisí znečišťujících látek je výrazně nižší.

Pojem odpad má dnes širší význam, než tomu bylo dříve. Jedná se o cennou komoditu – zdroj energie a druhotný zdroj surovin zároveň (např. železných a neželezných kovů). Tyto faktory vedou k situacím, kdy je výhodné přepravovat odpad i na velké vzdálenosti. To iniciuje rozvoj jednotného trhu s odpadem. V takovém prostředí se předpokládá systematické plánování výstavby a provozu nových kapacit v blízké budoucnosti za účelem splnění závazků ke snížení množství skládkovaného BRKO [5]. Tyto nové kapacity mohou zahrnovat nejen zařízení EVO, ale také zařízení MBÚ.

Projekty MBÚ se začaly rozšiřovat do několika zemí EU po roce 1990. Tento proces zahrnuje mechanické drcení, separaci odpadů a následně biologické zpracování (anaerobní rozklad, případně aerobní kompostování). Tato technologie rozděluje vstupní tok odpadu do několika frakcí. Podrobnější informace o této metodě lze nalézt v [13]. Jedním z produktů MBÚ je tzv. lehká frakce (LF). Díky dostatečné výhřevnosti je možné ji využít jako palivo ve spalovacích zařízeních (elektrárny, cementárny, atd.). Nalezení koncovek pro využití LF je zásadní pro efektivní provoz zařízení MBÚ. Tento názor je podporován různými studiemi zaměřenými na posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment – LCA) v OH. LCA pomáhá obecně zhodnotit efektivitu použití technologie MBÚ. Článek [14] ukázal, že při posuzování hlavních dopadů (ekonomických, ekologických) jednotlivých metod zpracování, je přímé spalování neupraveného odpadu v zařízení EVO nejvýhodnější strategií. V případě spoluspalování LF (produktu MBÚ) bylo popsáno v [15] zvýšené riziko koroze teplosměnných ploch díky přítomnosti chloru. MBÚ byla důležitým tématem OH v období okolo roku 1990. V některých zemích, např. v Itálii a Německu byla tato technologie stále více využívána. Dnes je tento koncept v západní Evropě spíše okrajový a je navržen jako provizorní řešení pro země ve skupinách 2 a 3 dle výše zmíněného rozdělení.

Vzhledem k tomu, že tyto dva procesy (tj. přímé spalování KO v zařízeních EVO a výroba LF v MBÚ) mají v celkové bilanci velmi rozdílné výstupní toky, v obr. 6 jsou shrnuty klíčové údaje vztahující se ke každému z uvažovaných procesů.



Pozn.: TAP – tuhé alternativní palivo; ZEVO – zařízení pro energetické využití odpadu

Obr. 6: Porovnání celkové hmotnostní bilance pro zařízení EVO a MBÚ, vychází z [16]

1.2 Situace v České republice

Česká republika se do roku 2020 na základě směrnice Rady evropské unie 1999/31/ES [17], implementované vyhláškou č. 294/2005 Sb., zavázala odklonit od skládkování 65 % biodegradabilního materiálu v porovnání s množstvím ukládaným v roce 1995. Ve SKO je obsaženo cca 50 % biologicky rozložitelné složky a proto právě SKO tvoří klíčový typ odpadu, kterému musí být věnována pozornost. Odklonění BRKO od skládkování by mělo probíhat, stejně jako u ostatních odpadů, dle jistých pravidel. Evropský parlament schválil rámcovou směrnici o odpadech 2006/12/ES [18], která upravuje požadavky na nakládání s odpady v celé EU. Tato rámcová směrnice poprvé na evropské úrovni v závazném právním předpisu jasně definuje hierarchii nakládání s odpady. Bodový seznam cílů v rámci OH v ČR je následující:

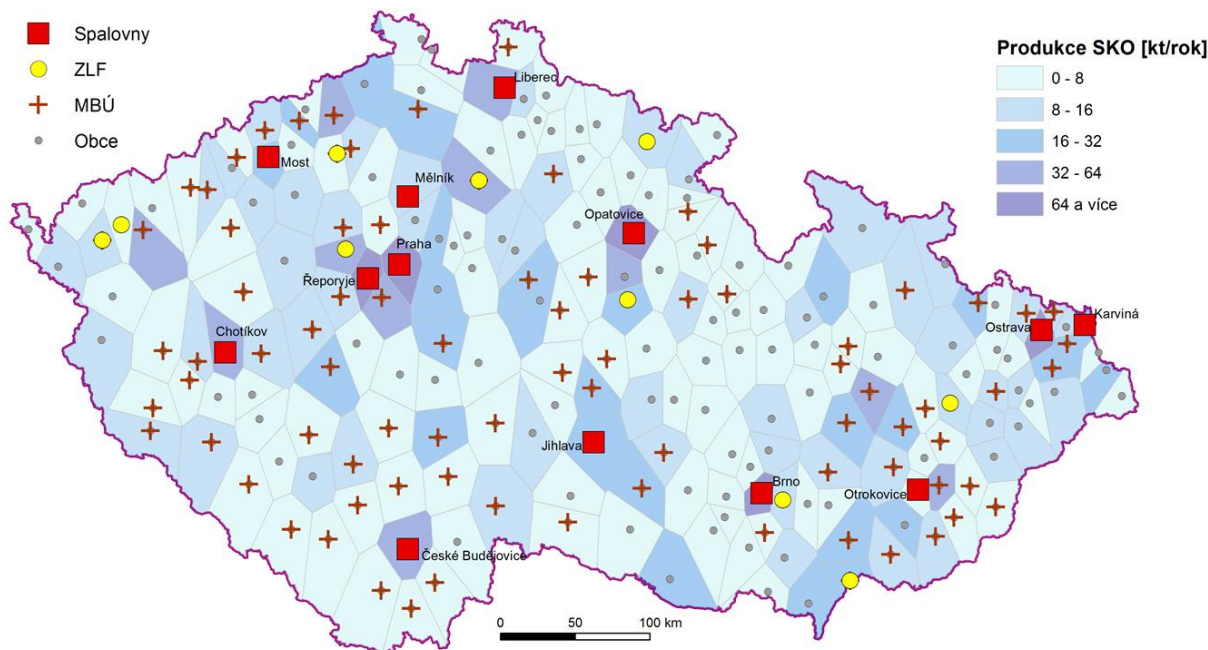
- Komunální odpad: zvýšit celkovou úroveň přípravy k opětovnému použití a recyklaci do roku 2020 nejméně na 50 % hmotnosti alespoň u odpadů z materiálů jako je papír, plast, kov, sklo (navrhuje se stanovení postupných hodnot 46 % v roce 2016 a 48 % v roce 2018).
- Směsný komunální odpad (po vyřídění materiálově využitelných složek a BRKO a nebezpečných složek): zejména energeticky využívat v zařízeních k tomu určených v souladu s platnou legislativou.
- Biologicky rozložitelný komunální odpad: snížit maximální množství ukládané na skládky v roce 2020 na nejvíce 35 % hmotnosti z roku 1995 (tzn. maximální množství skládkovaného SKO v roce 2020 je asi 1 100 kt).
- Obaly a obalové odpady:
 - zvýšit celkovou recyklaci obalů na úroveň 70 % do roku 2020,
 - zvýšit celkové využití odpadů z obalů na úroveň 80 % do roku 2020,
 - zvýšit recyklaci plastových obalů na úroveň 50 % do roku 2020,
 - zvýšit recyklaci kovových obalů na úroveň 55 % do roku 2020,
 - dosáhnout 55 % celkového využití prodejních obalů určených spotřebiteli do roku 2020,
 - dosáhnout 50 % recyklace prodejních obalů určených spotřebiteli do roku 2020.

V současné době je jediným funkčním regulačním mechanismem pro řízení toku KO v ČR kompenzační poplatek, který znevýhodňuje skládkování (500 Kč/t v roce 2015). To dává možnost existujícím zařízením EVO finanční konkurenceschopnosti (ZEVO Malešice, SAKO Brno, TERMIZO Liberec). V souvislosti se závazky ohledně snižování podílu skládkovaných odpadů je možné podniknout různá opatření. Nejjednodušší možností je postupné navyšování skládkovacího poplatku. Nové projekty pro energetické využití odpadu (EVO, MBÚ) vzniknou pouze v případě, že bude skládkovací poplatek ukotven do platné legislativy. Cílem je tedy vytvořit dostatečnou motivaci pro potenciální investory a zároveň nezatěžovat zbytečně producenty odpadu. Klíčová otázka tedy zní, jak nastavit skládkovací poplatek – jeho výši a průběh tak, aby byly splněny cíle ČR. Případně, kdy zvolit úplný zákaz skládkování neupraveného SKO tak, aby byl dostatečný prostor pro výstavbu nových zařízení na efektivnější nakládání s SKO. V ČR se přistoupilo ke stanovení zákazu skládkování od roku 2024 (Novela zákona o odpadech s číslem 229/2014 Sb. [19]). Průběh výše skládkovacího poplatku do roku 2024 zatím není ukotven v legislativě.

Z obr. 3 je patrné, že v zemích, které ve vysoké míře naplňují myšlenku hierarchie, stojí OH na dvou základních pilířích – materiálovém využití a energetickém využití. Z pohledu SKO (zbytkového materiálu mimo separovaný sběr) představuje právě energetické využití odpadů ve spalovnách (EVO) perspektivní řešení pro dosažení vytyčeného cíle odklonu KO od skládkování.

Problematikou vyhodnocení potenciálu odpadu k energetickému využití v regionech, lokalizací vhodných míst pro nová zařízení EVO z hlediska množství dostupných odpadů a možné dodávky tepla, identifikací budoucích investičních záměrů, kvantifikací celkových nákladů potřebných na výstavbu těchto zařízení a kvantifikací optimální veřejné podpory (investiční a provozní) spotřebitele se v roce 2011 zabývala studie [20].

Studie ukázala, že v roce 2020 bude muset být energeticky využito více než 3300 kt/r spalitelných KO. Pokud uvažíme současnou kapacitu EVO (tři provozovaná zařízení), jedná se celkem o asi 640 kt/r. Stále tak zůstává asi 2700 kt/r, které je potřeba odklonit od skládkování. V současnosti je v ČR v přípravě několik projektů na výstavbu zařízení EVO v různé fázi pokročilosti. Rozmístění potenciálních projektů v rámci výhledu pro rok 2020 vyplývající ze studie [20] je zobrazeno na obr. 7. Vedle zařízení EVO koncept uvažuje se zařízeními MBÚ a následným zpracováním jejich produktu (LF) v zařízeních k tomu určených (ZLF). Situace zobrazená na obr. 7 bude dále v této práci využívána, vychází z předpokladu maximálního využití energie vázané v odpadech v sítích centrálního zásobování teplem (CZT). Důležitým předpokladem platnosti výsledku je očekávaná míra nárůstu produkce SKO průměrně o 2,5 % ročně.



Obr. 7: Možné rozmístění zpracovatelských kapacit pro naplnění závazku ČR v roce 2020 [20]

Koncepční návrh každého z projektů představuje komplexní úlohu, která se dotýká problematiky modelování budoucího konkurenčního prostředí. Vzhledem k tomu, že se jedná o investičně velmi nákladný projekt (viz kap. 3), je přínosné mít k dispozici nástroj, který umožní posoudit jeho ekonomickou výhodnost resp. udržitelnost. K tomu lze využít metod matematického programování, které posouvají plánování investic o krok dále [21]. Vzhledem k tomu, že se zařízení EVO plánují na dobu životnosti přesahující 20 let, je zřejmé, že některé pro ekonomiku projektu stěžejní parametry se mohou v budoucnu značně měnit. Tyto změny pak mohou mít vliv na výhodnost projektu. Postihnout tuto neurčitost umožňují metody stochastického programování [22].

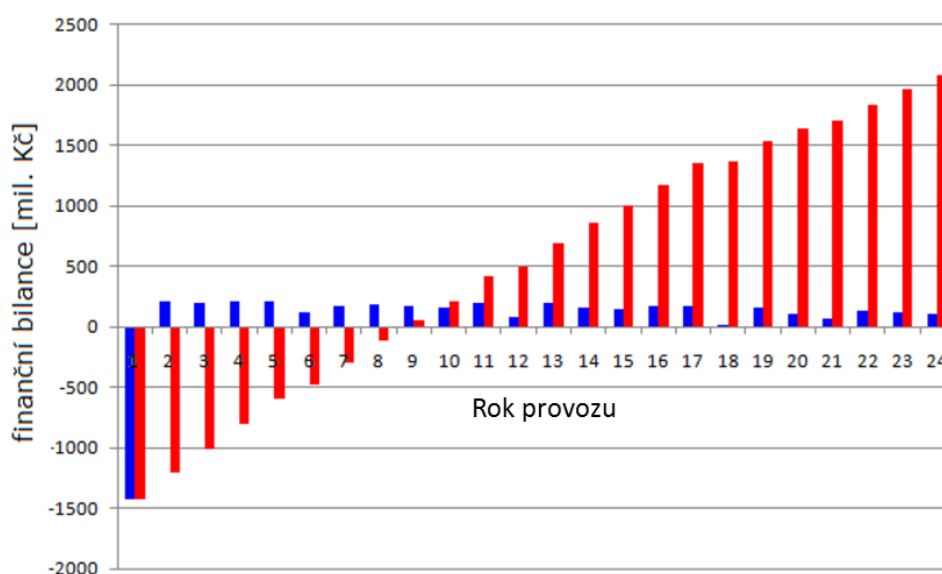
1.3 Cíle práce

Cílem práce je vytvořit nástroje, které využívají přednosti moderních výpočtových postupů, a tyto následně používat pro řešení praktických úloh. Konkrétně je v práci demonstrován přístup k finanční rozvaze a popsání rizik projektu s ohledem na výstavbu a provoz zařízení EVO pomocí stochastického programování. Vzhledem k tomu, že předmětem práce je vývoj výpočtových nástrojů pro optimální návrh klíčových prvků zařízení EVO, které podávají podpůrné informace o kvalitě investičního záměru, je nejdříve uveden stručný úvod do problematiky ekonomického hodnocení projektů s logickou vazbou na vícestupňové stochastické programování (kap. 2). Následuje popis matematického modelu pro koncepční návrh parametrů zařízení EVO (kap. 3). V kap. 4 a 5 jsou představeny rozsáhlé nástroje pro modelování konkurenčního prostředí v OH. Propojení všech úloh je následně demonstrováno v případových studiích v kap. 7.

2. Úvod do ekonomického hodnocení projektů a přínos stochastického programování

Výpočtové nástroje, které jsou představeny v dalších kapitolách, jsou úzce spojeny s hodnocením udržitelnosti a atraktivity investičních záměrů. Kritériem výpočtu je přítom maximalizace ziskovosti investice (úloha v kap. 3) resp. minimalizace provozních nákladů (viz kap. 4 a 5).

Pro finanční hodnocení je v praxi užíváno více ekonomických ukazatelů. Mezi nejpoužívanější patří čistá současná hodnota projektu (Net Present Value - *NPV*), vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return - *IRR*), případně doba návratnosti investice (Payback Period - *PBP*). Všechna tři kritéria vycházejí z finančního toku (viz grafická reprezentace v obr. 8).



Pozn. modré sloupce značí finanční tok aktuálního roku, červené sloupce značí kumulativní součet finančních toků v jednotlivých letech.

Obr. 8: Ukázka finančního toku pro zařízení EVO průběhu životnosti [23]

Při výpočtu *NPV* si investor stanoví požadované zhodnocení své investice (tzv. diskontní míru i) a ze vzorce (1), ve kterém vystupují výnosy a náklady plynoucí z provozu je patrné, jestli investice splňuje požadované parametry ($NPV > 0$):

$$NPV = \sum_{r \in R} \frac{CF_r}{(1+i)^r}, \quad (1)$$

kde CF_r (Cash Flow) značí peněžní tok r -tého roku a i představuje požadovanou diskontní míru. V případě, že má projekt ziskovost nad požadovanou úrokovou míru, *NVP* je kladná. V opačném případě jsou nutné určité korekce projektu pro splnění požadovaného výnosu.

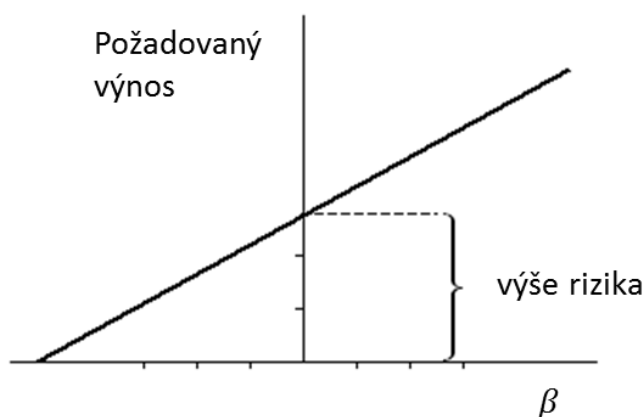
Kritérium *PBP* spočívá v nalezení doby návratnosti počáteční investice. Ta udává rok, pro který kumulativní zisk převyšuje počáteční investici. Kritérium *IRR* je založeno na obdobném principu jako *NPV*. Úroková míra označená jako *IRR* se dopočítává pro $NPV = 0$. Vzorec vypadá následovně:

$$0 = \sum_{r \in R} \frac{CF_r}{(1 + IRR)^r} \quad (2)$$

Z výsledku musí investor sám rozhodnout o kvalitě investice. Limitní hodnota *IRR* není exaktní informace pro finální rozhodnutí. Zásadní vliv zde hraje míra rizika, které vede k dosažení požadovaného *IRR*, a také možnosti, které nabízí trh (alternativní možnosti investice). Pro stanovení přijatelné výše *IRR*, při kterém je daná investice atraktivní, slouží ukazatel oceňování kapitálových aktiv (Capital Asset Pricing Model – CAMP [24]). Ten bere v úvahu míru rizikovosti investice vůči možnosti bezrizikového investování. Myšlenka spočívá v ohodnocení rizik a navýšení požadovaného *IRR* bezpečné investice o tato rizika. Nalezení požadovaného *IRR* pomocí aplikace CAMP je uvedeno v následujícím vzorci:

$$IRR = R_f + \beta(R_m - R_f) + R_c + R_o, \quad (3)$$

kde R_f označuje bezrizikovou investici (většinou se vztahuje na 10 leté státní dluhopisy USA), R_m popisuje očekávaný výnos (zpravidla 4 – 6 % nad bezrizikovou investici), R_c značí rizikovost země (dle [25] je ČR bezpečnou lokalitou pro investování, riziko je zde ohodnoceno na 0,85 %, platí pro rok 2014), v R_o jsou obsažena ostatní rizika (v našem případě jde o legislativní zásahy a konkurenční projekty v ČR, ale i v zahraničí). Koeficient β se vztahuje na historický vývoj daného oboru. Pro jeho grafické znázornění se používá SML (Security Market Line). V případě, že se požadovaný výnos investice pohybuje nad přímkou, převyšují zisky rizikovou premii. V opačném případě je riziko příliš vysoké a je žádoucí požadavky na výnosnost investice zvýšit. Ideový graf je na obr. 9.



Obr. 9: Závislost požadované ziskovosti investice na míře rizika β

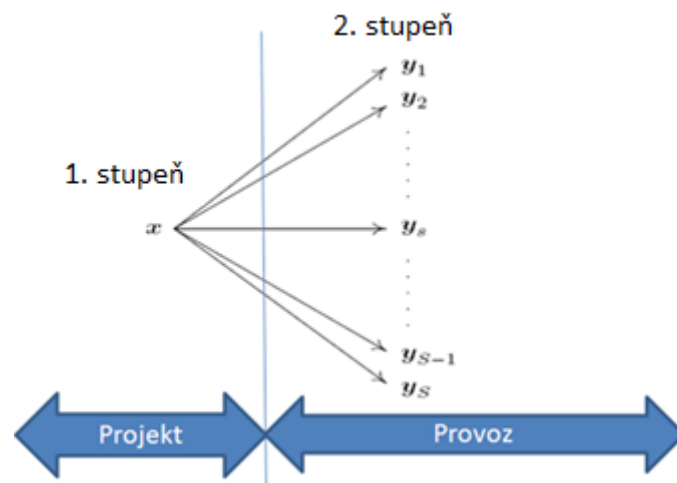
Hodnota koeficientu β závisí na variabilitě výnosů jednotlivých projektů v daném oboru vůči průměrné výnosnosti. V odvětvích, kde se historicky nacházely výrazné ekonomické poklesy jednotlivých projektů oproti průměrné výnosnosti odvětví, vzrůstá riziko investice a opačně. V našem konkrétním případě se jedná o průnik energetického průmyslu (EP) a OH. Obě odvětví vykazují dlouhodobě malou rizikovost. Dle [25] je β pro EP 0,47 a pro OH 0,86. Po dosazení všech parametrů do vzorce (3) se požadované *IRR* z pohledu privátního investora pohybuje někde okolo 10% hranice (v případě projektu v ČR). Zbývá popsat ostatní rizika v podobě vývoje legislativy a konkurenčních projektů (R_o). Tato rizika se intuitivně velmi těžko odhadují, a právě z toho důvodu byl vytvořen výpočtový nástroj, který popisuje problematiku OH z globálního pohledu (viz kap. 4). Z důvodu snadné implementace do optimalizační úlohy je pro výpočty uvažováno kritérium *IRR*. V praxi se velmi často používá i kritérium, které udává vážené průměrné náklady na kapitál (Weighted average cost of

capital - WACC). Jde v podstatě o rozšířenou verzi *IRR*, kde se při výpočtu *WACC* navíc bere v úvahu použití cizího kapitálu s danou úrokovou mírou. V případě výhodného financování u metody *WACC* je možné dosáhnout vyššího výnosu než u přístupu založeném na *IRR*. To nastane v momentě, kdy si investor dokáže půjčit kapitál za nižší úrokovou míru, než je jeho požadovaný zisk u kritéria *IRR*. V textu je dále uvažováno s kritériem založeným na *IRR* a při vhodném úvěrování je možné výnos ještě zvýšit.

Z charakteru úloh prezentovaných v kap. 3 až 5 je vhodné uvažovat o přístupu založeném na dvoustupňovém stochastickém programování se scénáři. Tato úvaha vyplývá z nutnosti uchopit neurčitosti vstupující do úlohy (budoucí vývoj cen energií, poptávka po teple, výhřevnost odpadu, produkce odpadu atd.). Pro tyto neurčitosti je možné modelovat různé scénáře budoucího vývoje a hledat robustní řešení vůči budoucí realizaci (vývoj) neurčitých parametrů. Charakter jednotlivých stupňů stochastického programování je následující:

1. Rozhodnutí, která jsou učiněna na začátku. V tomto momentě nejsou žádné informace o konkrétní budoucí realizaci náhodných parametrů. Jinak řečeno, rozhodnutí musí být provedeno dříve, než lze pozorovat realizaci neurčitých parametrů. Takovému rozhodnutí se říká rozhodnutí v prvním stupni (úloha v kap. 3) nebo také přístup „here and now“ (HN).
2. Rozhodnutí vykonané po konkrétní realizaci parametrů, tedy v momentě, když jsou již tyto parametry známé, se nazývá rozhodnutí ve druhém stupni (úlohy v kap. 4 a 5) nebo také přístup „wait and see“ (WS).

Princip dvoustupňového stochastického programování je schematicky zachycen na obr. 10.



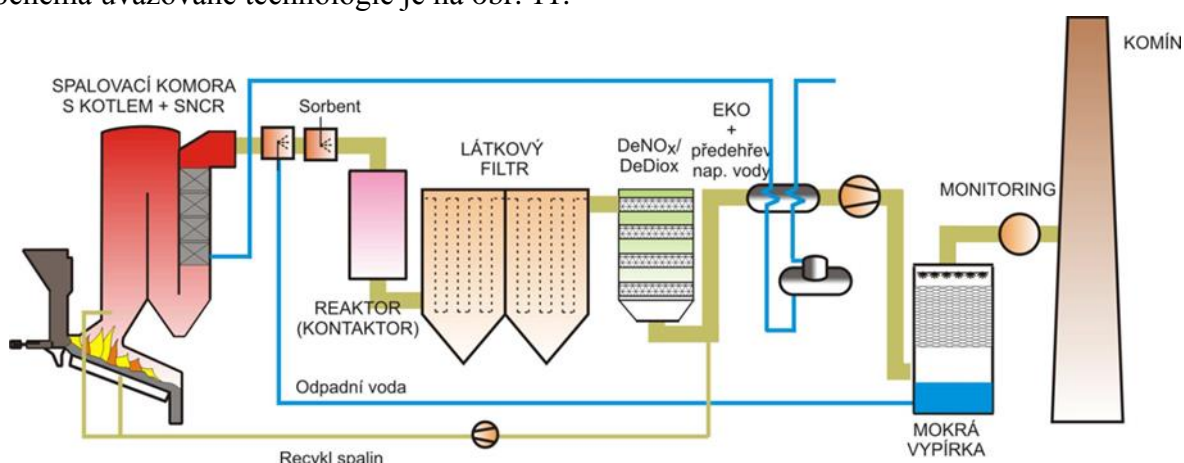
Pozn.: x značí rozhodnutí např. o kapacitě spalovny, volbě turbíny (protitlaká – PT nebo kondenzační odběrová – KOT), velikosti odběru; $y(\xi)$ pak může znamenat rozhodnutí o způsobu provozování zařízení (orientace na výrobu tepla nebo na výrobu elektřiny) podle vývoje podstatných parametrů, které ovlivňují ekonomiku projektu (cena tepla, cena elektrické energie).

Obr. 10: Schéma dvoustupňového stochastického programování

První stupeň se v našem případě týká počátečního investičního rozhodnutí x , kdy není znám vývoj jednotlivých vstupních parametrů. V druhém stupni je možné provést opravné rozhodnutí $y(\xi)$ v momentě, kdy jsou budoucí realizace ξ již známy. U zařízení EVO jde o řízení provozu v návaznosti na konkrétních podmínkách.

3. Výpočtový nástroj pro návrh klíčových prvků zařízení EVO

Níže uvedený model představuje první aplikaci stochastického programování prezentovanou v této práci. Cílem úlohy je provést rozhodnutí o velikosti roční zpracovatelské kapacity zařízení EVO a o volbě jednotlivých subsystémů, které umožní maximální zisk z následného provozu. Tato úloha je prvním krokem dvoustupňového stochastického programování. Pro optimální rozhodnutí zde využijeme přístupu HN (blíže vysvětleno v [26]). Při vytváření matematického modelu (omezení a účelové funkce) zařízení EVO byl využit model z [23]. Schéma uvažované technologie je na obr. 11.



Obr. 11: Schéma uvažované technologie EVO

Jedná se o model zařízení EVO s výrobou páry o parametrech 400 °C a 4 MPa. Dále se uvažuje obecný model kondenzační odběrové turbíny tvořené dvěma turbinovými stupni, kde tlak páry za protitlakou částí, případně tlak odběru, je uvažován 0,8 MPa. Než je možné přistoupit k tvorbě matematického modelu, je třeba detailně rozpracovat technicko-ekonomický model (T-E model) popisovaného zařízení. To umožňuje zjednodušit některé vazby v systému (např. odhad výroby energií, vlastní spotřeby energií, zjednodušit vztahy týkající se nákladů plynoucích z provozu atd.). Tomuto bodu se věnuje následující část textu.

3.1 Technicko-ekonomický model zařízení EVO

Návratnost investic (kvantifikovaná např. pomocí *IRR*) je klíčovým faktorem při plánování projektů. Potenciální investor určuje *IRR* na základě alternativních investičních možností a potenciálních rizik spojených s projektem (viz kap. 2). T-E model je nezbytný pro odhad cash flow v jednotlivých letech provozu zařízení.

Pro tuto analýzu byl použit tzv. *Flexi model* pro operativní hodnocení zařízení EVO, který je vyvíjen na pracovišti Ústavu procesního a ekologického inženýrství, VUT v Brně (ÚPEI). Technická část je založena na zjednodušeném modelu rovnováhy mezi klíčovými technologickými částmi. Tento model umožňuje širokou škálu nastavení vstupních parametrů,

takže je možné jej přizpůsobit konkrétnímu projektu. Nastavitelné parametry umožňují uživateli zvolit například mezi protitlakou a kondenzační odběrovou parní turbínou s jedním nebo dvěma odběry. Dalším upravitelným parametrem je způsob vyvedení tepla. Export tepla lze nastavit pro dva odběry turbíny: jeden s vyšším tlakem a dodávku tepla prostřednictvím páry a druhý pro export tepla ve formě horké vody. Je zde možnost využít a integrovat provozní údaje a zkušenosti z existujících zařízení.

Na technický model navazuje komplexní ekonomický model. Tento model obsahuje podobně nastavitelné vstupy týkající se nákladů (např. investice a reinvestice, provozní náklady, náklady na mzdy, daně, atd.) a příjmy (za zpracování odpadu, prodej elektřiny a tepla, výhody a bonusy při kombinované výrobě tepla a elektrické energie atd.). Typická struktura výnosů a výdajů je uvedena v grafu na obr. 12.



Obr. 12: Příklad struktury příjmů (vlevo) a výdajů (vpravo) [27]

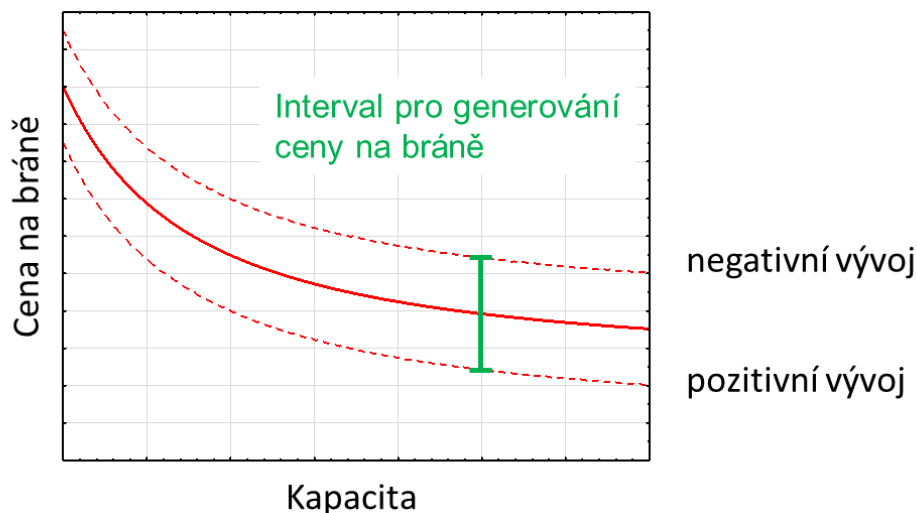
Výhodou *modelu Flexi* je, že umožňuje simulaci zařízení EVO po celou předpokládanou dobu životnosti. Elementární časový krok pro technické části je jeden měsíc a výchozí nastavení životnosti zařízení je 25 roků.

Technické vstupy je možné zadat jako průměrné měsíční údaje pro každý parametr, a to včetně možnosti reinvestic (úprava nebo změna technologie). Ekonomický model je založen na průměrných ročních údajích. Hlavní parametry mohou být během těchto časových období změněny (měsíčně: LHV, dostupnost odpadu, výroba tepla a elektřiny a ročně: trendy cen tepla, elektřiny, atd.).

Model Flexi poskytuje datovou sadu pro jednotlivé parametry při určitém způsobu provozu zařízení. To umožňuje složité děje popsat pomocí funkčních závislostí, které mohou být implementovány do matematického modelu.

Dalším důležitým výstupem z T-E modelu jsou odhady intervalů cen na bráně (cena za zpracování odpadu) zajišťující požadovanou ekonomiku projektu. Pro určitý vývoj důležitých parametrů (např. cena tepla) a jedno kapacitní řešení je možné sestavit interval ceny na bráně (viz ilustrační obr. 13). Pro různá kapacitní řešení jednoho projektu se mění tento interval, protože se zohledňují změny v měrných investičních nákladech a současně v dodávce tepla. Jelikož je množství tepla, které lze uplatnit v síti CZT, omezené, může být rozmezí pro cenu na bráně užší pro větší kapacity. Tento jev je přitom výraznější u CZT s malou poptávkou po teple vzhledem ke kapacitě EVO. Důvodem je menší podíl tržeb za dodané teplo na celkových příjmech zařízení EVO. Spojením jednotlivých intervalů získáme pás (viz obr. 13),

který lze matematicky popsat a vytvořený model implementovat do optimalizační úlohy. Konkrétní ukázka generování závislosti ceny na bráně na kapacitě je publikována v [28]. Tento výstup bude dále využíván v kap. 4.



Obr. 13: Intervalový pás pro cenu na bráně v závislosti na kapacitě

Klíčovým faktorem pro odhad ceny na bráně je kvalitní odhad investičních nákladů. Ty jsou ovlivněny převážně zpracovatelskou kapacitou a použitou technologií. Detailně se této problematice věnuje následující část textu.

3.2 Odhad investičních nákladů jednotek s kapacitou nad 100 kt/r

Investiční náklady u zařízení EVO jsou silně korelované se zpracovatelskou kapacitou. Zároveň s vyšší zpracovatelskou kapacitou klesají měrné investiční náklady přepočtené na 1 t zpracovaného odpadu. Pro každý subsystem je tato změna jiná. To je dáno konkrétním typem subsystemu, např. IT systém, monitoring apod., jsou pro různé kapacitní řešení téměř shodné a jsou tedy obdobně investičně nákladné. Oproti tomu stavební část, např. bunkr, je pro vyšší kapacity výrazně dražší. Závislost investičních nákladů na zpracovatelské kapacitě lze popsat mocninou funkcí, která je tvaru:

$$I = a_1 C^{a_2}, \quad (4)$$

kde a_i ($i = 1,2$) jsou hledané regresní koeficienty. Po jednoduché úpravě je možné funkci udávající hodnotu investice napsat ve tvaru:

$$I_2 = I_1 \cdot \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{exp}, \quad (5)$$

kde:

- I_2 – investiční náklady technologie s kapacitou C_2 [tis. Kč].
- I_1 – investiční náklady technologie s referenční kapacitou [tis. Kč].
- C_2 – kapacita [kt/r].
- C_1 – referenční kapacita [kt/r].
- exp – exponent vyjadřující nárůst investičních nákladů s kapacitou (koeficient a_2 z rovnice 4).

Klíčové pro hodnotu investice je rozhodnutí o počtu linek. V některých případech je možné pro určitou zpracovatelskou kapacitu volit různý počet linek. Vyšší počet linek pak umožňuje snadněji plánovat údržbu jednotlivých částí zařízení v průběhu provozu, výrazně se tím ale zvyšuje počáteční investice. Při odhadu investičních nákladů jsou uvažovány následující subsystémy:

- stavební část,
- strojní zařízení, dávkování odpadu,
- spalovací zařízení, utilizace tepla,
- strojní zařízení, čištění spalin,
- spalinovody, komín,
- pomocné provozy,
- elektro, měření a regulace,
- energocentrum.

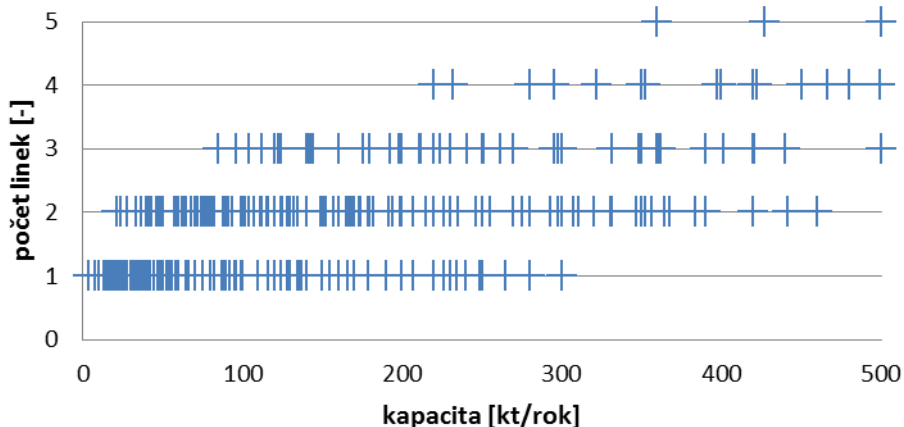
Každý z těchto subsystémů má více interních zařízení. Pro každé z těchto zařízení byl odhadnut koeficient změny investičních nákladů v souvislosti se změnou kapacity a počtu linek. Jako příklad je možné uvést bunkr – v případě vyšší kapacity je uvažováno s exponentem mocninné řady 0,7; u výstavby samostatného bunkru pro každou linku je koeficient 1. Na stejném principu byly odhadnuty koeficienty pro všechny uvažované subsystémy. Pomocí těchto koeficientů byly vypočítány investiční náklady pro různé konfigurace kapacitních řešení a počtu linek, výsledné investiční náklady v mil. Kč jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Odhad investičních nákladů pro různý počet zpracovatelských linek

Kapacita [kt/r]	1 linka	2 linky	3 linky	4 linky
100	2200			
150	2823	3373	3847	4280
200	3392	4006	4529	5001
250	3924	4598	5166	5674
300	4430	5160	5769	6312
350	4914	5698	6347	6922
400	5381	6216	6903	7509

Pozn.: zvýrazněné hodnoty značí zvolený počet linek pro vytvoření modelu funkční závislosti investičních nákladů na kapacitě (viz obr. 15).

Zvolený počet linek pro dané kapacity byl stanoven na základě obr. 14. Tato data byla získána z databáze spaloven ISWA (International Solid Waste Association).

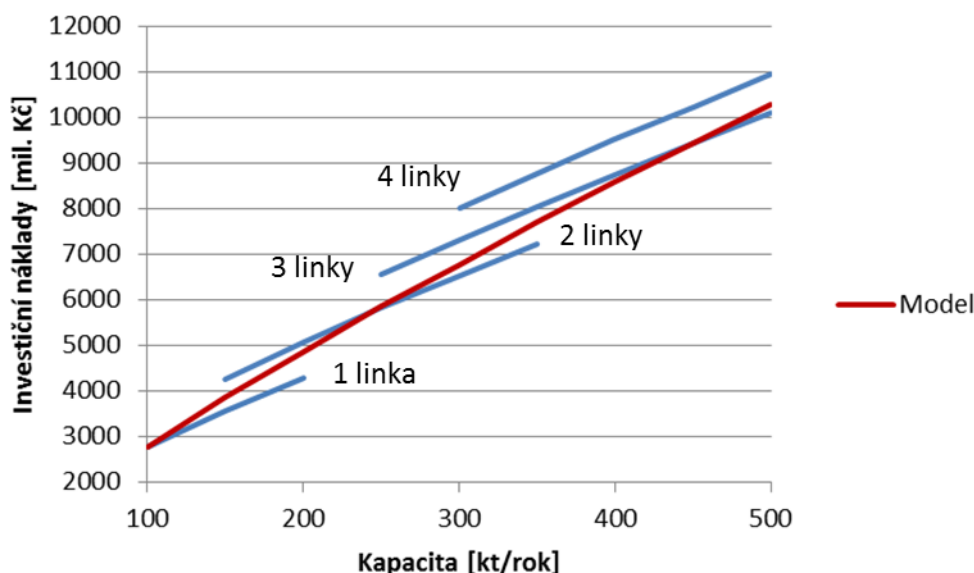


Obr. 14: Závislost počtu linek na kapacitě [29]

Pro nalezení koeficientů mocninné funkce byl minimalizován součet čtverců odchylek u výsledků mocninné funkce a investičních odhadů z tab. 1 (označené varianty). Použitý vzorec pro výpočet investičních nákladů vypadá následovně:

$$I_2 = I_1 \cdot \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{0,8161} . \quad (6)$$

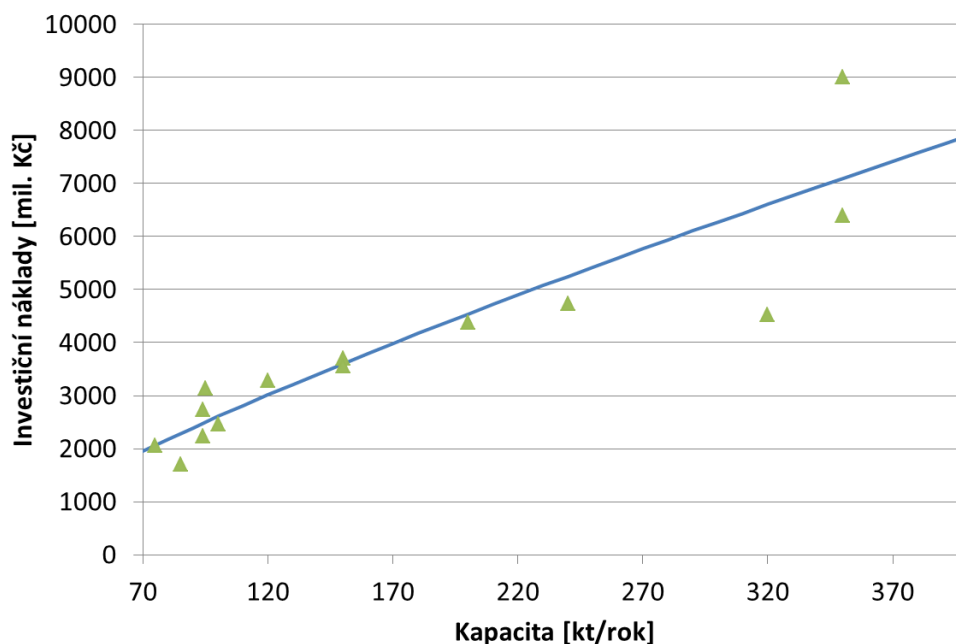
Kde I [mil. Kč] označuje investiční náklady a C [kt/r] udává zpracovatelskou kapacitu. Index 1 označuje referenční kapacitu (v našem případě se jedná o 100 kt/r). Index 2 popisuje hledané zařízení. Závislost investičních nákladů na kapacitě pro různé počty linek je uvedena na obr. 15.



Obr. 15: Závislost investičních nákladů na kapacitě

Pro konkrétní případ je možné modifikovat investiční náklady na zvolenou technologii a počet linek na míru řešeného projektu a s ohledem na místní podmínky. V popsaném modelu je uvažována konvenční technologie s roštovým ohništěm s využitím páry v odběrové turbíně a čištěním spalin založeným na mokré vypírce. Tento obecný model (obr. 11) bude

dále v práci používán pro všechny uvažované projekty ve všech výpočtových studiích. Pro ověření uvedeného modelu investičních nákladů bylo provedeno porovnání s reálnými projekty z minulého období očištěnými o inflaci. Porovnání je uvedeno na obr. 16. S ohledem na povahu údajů jsou projekty uvedeny bez informací o dodavateli technologií.



Obr. 16: Porovnání modelu investičních nákladů s reálnými projekty

Obr. 16 dokládá relevantnost vytvořeného modelu. Odchytky jsou dány zvolenou technologií, především systémem čištění spalin. Model vykazuje vysokou přesnost v nižších kapacitách do 250 kt/r. U vyšších kapacit jsou investiční náklady více variabilní, což má za následek vyšší hodnotu reziduí. S ohledem na budoucí použití modelu je přesnost u vyšších kapacit dostačující.

Následující text se bude věnovat matematickému popisu T-E vazeb u zařízení EVO. Vytvořený matematický model bude sloužit k optimálnímu nastavení parametrů u jednotlivých technologických částí zařízení (např. kotel, turbína, atd.).

3.3 Matematický model

Pro větší přehlednost jsou nejdříve zavedeny všechny potřebné indexové množiny. R značí množinu roků v průběhu životnosti zařízení, mohutnost množiny $|R| = 25$. Z důvodu odlišné poptávky po teple v průběhu roku, je zavedena množina měsíců M , $|M| = 12$. Ve výpočtu uvažujeme dále scénáře vývoje poptávky po teple. Scénáře jsou označeny J , mohutnost této množiny (počet scénářů) bude dána konkrétní řešenou úlohou. Vektor $\mathbf{0}$ představuje nulový vektor, jeho rozměr je dán kontextem.

Omezení

Vektor $\mathbf{x}^j = (x_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ označuje vstupní množství SKO v t/měsíc, které je dávkováno do roštového ohniště. Množství spalovaného SKO je omezené technickými parametry ohniště (diagram roštu – tato problematika byla detailněji rozpracována v [30]). Vektor, který udává

horní mez pro dávkované množství SKO je označeno $\mathbf{b} = (b_{rm}(c))_{r \in R, m \in M}$. Složky tohoto vektoru závisí na zpracovatelské kapacitě c . Vzniklé omezení na vstup paliva je tedy tvaru:

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{x}^j \leq \mathbf{b}(c), \quad \forall j \in J. \quad (7)$$

Energie generovaná spalováním SKO, která vstupuje z ohniště do kotle je označena $\mathbf{u}^j = (u_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$. Hodnotu výhřevnosti SKO označíme α . Potom funkce \mathbf{f} určuje množství energie obsažené v palivu (SKO). Energie vzniklá spalováním SKO je dána vztahy:

$$\mathbf{u}^j = \mathbf{f}(\mathbf{x}^j; \alpha), \quad \mathbf{u}^j \geq \mathbf{0}, \quad \forall j \in J. \quad (8)$$

Vektor $\mathbf{v}^j = (v_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ označuje množství páry vyrobené v kotli v t/měsíc. Účinnost kotle označíme η (pro jednoduchost je možné uvažovat konstantní účinnost $\eta = 81\%$). Potom funkce \mathbf{g} popisuje množství vyrobené páry. Vzniklá rovnice a omezení na výrobu páry je tvaru:

$$\mathbf{v}^j = \mathbf{g}(\mathbf{u}^j; \eta), \quad \mathbf{v}^j \geq \mathbf{0}, \quad \forall j \in J. \quad (9)$$

Vyrobená pára je vedena na protitlakou část turbíny a za ní se dělí na páru na výrobu tepla, která předává svou energii do systému CZT, a páru na výrobu elektřiny, která pokračuje na kondenzační stupeň turbíny. Vektorem $\mathbf{v}_t^j = (v_{t,rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ je označena pára na výrobu tepla a vektorem $\mathbf{v}_e^j = (v_{e,rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ pára na výrobu elektřiny. Platí, že $\mathbf{v}^j = \mathbf{v}_t^j + \mathbf{v}_e^j$. V modelu je nutné brát v potaz technologické omezení na průtok páry kondenzační částí - $\mathbf{v}_e^j \geq 0,1 \mathbf{v}^j$. Dále vektor $\mathbf{i}^j = (i_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ označuje množství vyrobeného tepla a vektor $\mathbf{y}^j = (y_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ množství vyrobené elektřiny. Písmeno β_1 reprezentuje spotřebu páry na výrobu elektrické energie průchodem protitlakou částí turbíny. Symboly γ_1, γ_2 označují účinnosti protitlaké a kondenzační částí turbíny. Funkce \mathbf{l} popisuje výrobu tepla a funkce \mathbf{h} popisuje výrobu elektřiny. Maximální výkon turbíny je označen b_t . Vzniklé vztahy popisující spotřebu páry na výrobu užitečného tepla a elektrické energie jsou tvaru:

$$\mathbf{i}^j = \mathbf{l}(\mathbf{v}_t^j; \beta_1), \quad \mathbf{i}^j \geq \mathbf{0}, \quad \forall j \in J. \quad (10)$$

$$\mathbf{y}^j = \mathbf{h}(\mathbf{v}_t^j, \mathbf{v}_e^j; \beta_1, \gamma_1, \gamma_2), \quad \mathbf{0} \leq \mathbf{y}^j \leq b_t, \quad \forall j \in J. \quad (11)$$

Vektor $\delta^j = (\delta_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ určuje množství energie, která se maří v kondenzátoru. Dále je zavedena β_2 určující spotřebu energie po průchodu páry kondenzačním stupněm. Funkce \mathbf{o} popisuje kondenzaci páry zpět na vodu ve vzduchovém chladiči (kondenzátoru). Dále je zaveden maximální výkon kondenzátoru. Toto maximum je označeno b_k . Proces kondenzace a omezení na možné maření tepla jsou popsány vztahy:

$$\delta^j = \mathbf{o}(\mathbf{v}_e^j; \beta_1, \beta_2), \quad \mathbf{0} \leq \delta^j \leq b_k, \quad \forall j \in J. \quad (12)$$

Dále je třeba v modelu uvažovat omezení spojené s vlastní spotřebou energií, tedy s energií využitou k provozu samotného zařízení. Vektor $\theta_t^j = (\theta_{t,rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ označuje vlastní spotřebu tepla a vektor $\theta_e^j = (\theta_{e,rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ značí vlastní spotřebu elektrické energie. Funkci udávající množství tepla spotřebovaného spalovnou je označeno ϵ_t . Analogicky funkci udávající množství spotřebované elektrické energie udává ϵ_e . Dále vektor $\mathbf{t}_p^j = (t_{p,rm}^j)_{r \in R, m \in M}$ udává množství prodaného tepla a vektor $\mathbf{e}_p^j = (e_{p,rm}^j)_{r \in R, m \in M}$

popisuje množství prodané elektrické energie. Omezení vyplývající z vlastní spotřeby tedy jsou:

$$\theta_t^j = \varepsilon_t(x^j), \quad \mathbf{0} \leq \theta_t^j \leq \mathbf{i}^j, \quad \theta_e^j = \varepsilon_e(x^j), \quad \mathbf{0} \leq \theta_e^j \leq \mathbf{y}^j, \quad \forall j \in J. \quad (13)$$

$$\mathbf{t}_p^j = \mathbf{i}^j - \theta_t^j, \quad \mathbf{e}_p^j = \mathbf{y}^j - \theta_e^j, \quad \forall j \in J. \quad (14)$$

Poslední technické omezení se vztahuje k otázce zajištění poptávky po teple, které je reprezentováno vektorem $\mathbf{d}^j = (d_{rm}^j)_{r \in R, m \in M}$. Poptávka se pro každý rok provozu zařízení mění podle scénářů vývoje. Podle své výše omezuje možné množství prodaného tepla do CZT. Toto omezení vypadá následovně:

$$\mathbf{t}_p^j \leq \mathbf{d}^j, \quad \forall j \in J. \quad (15)$$

Ekonomické vstupy do omezení

Základem při sestavování ekonomické analýzy je stanovení peněžních toků CF_r v jednotlivých letech $r \in R$ uvažované životnosti zařízení. Peněžní toky jsou dány celkovými náklady a výnosy z provozu. Součástí nákladů jsou i počáteční investice a daňové vyrovnání se státem. Ekonomická výhodnost je hodnocena pomocí *IRR* (viz rovnice 2).

Příjmy a výdaje

Funkce určující počáteční investici do výstavby EVO je označena $I = I(c)$. Tato funkce zahrnuje investici do realizace jednotlivých částí zařízení EVO a je závislá na zpracovatelské kapacitě (c). V úloze je řešena volba kapacity kotle, turbíny a kondenzátoru zvlášť. Všechny ostatní součásti, které nejsou ovlivněny rozhodnutím \mathbf{x} z prvního stupně (sklad paliva, čištění spalin, měření atd.) jsou zahrnuty ve výrazu $I_v = I_v(c)$. Investice do pořízení kotle je označena $I_k = I_k(c)$. Investici spojenou s pořízením turbíny udává $I_t = I_t(c)$. Poslední pořizovací náklad, který spadá do počáteční investice je systém maření páry související s kondenzační odběrovou turbínou (kondenzátor) $I_{kon} = I_{kon}(c)$. Rovnice určující celkovou investici je tedy tvaru:

$$I(c) = I_v(c) + I_k(c) + I_t(c) + I_{kon}(c). \quad (16)$$

Náklady spojené s provozem spalovny v r -tém roce ($r \in R$) a pro j -tý ($j \in J$) scénář bude charakterizovat funkce $N_r^j = N_r^j(\mathbf{x}^j, c)$. Tato funkce se skládá z dílčích nákladů, mezi které patří: náklady na údržbu $N_{u,r} = N_{u,r}(c)$, náklady na reinvestice $N_{re,r} = N_{re,r}(c)$, náklady na mzdy $N_{m,r} = N_{m,r}(c)$, náklady spojené se zpracováním odpadu $N_{zo,r}^j = N_{zo,r}(\mathbf{x}^j)$ a náklady spojené se zpracováním reziduí $N_{rez,r}^j = N_{rez,r}(\mathbf{x}^j)$. Rovnice určující celkovou výši nákladů spojených s provozem je tedy ve tvaru:

$$N_r^j(\mathbf{x}^j, c) = N_{u,r}(c) + N_{re,r}(c) + N_{m,r}(c) + N_{zo,r}(\mathbf{x}^j) + N_{rez,r}(\mathbf{x}^j). \quad (17)$$

Pro označení výnosů zařízení EVO v r -tém roce ($r \in R$) a j -tý ($j \in J$) scénář zavedeme funkci $P_r^j = P_r^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j)$. Stejně jako ostatní funkce vyskytující se v (17) i P_r^j se skládá z řady dílčích členů. Mezi ně patří funkce určující výši příjmů za zpracování SKO, která je značena $P_{p,r}^j = P_{p,r}^j(\mathbf{x}^j)$. Dále se jedná o funkci $P_{t,r}^j = P_{t,r}^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j)$, která popisuje příjem z prodeje užitečného tepla. Dále funkce $P_{e,r}^j = P_{e,r}^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j)$ popisuje příjem z prodeje elektrické energie. S tímto ziskem se váže dotace na kogenerační výrobu, která je označena písmenem $P_{ke,r}^j = P_{ke,r}^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j)$. Dále uvažujeme funkci $P_{s,r}^j = P_{s,r}^j(\mathbf{x}^j)$, která určuje zisk z prodeje

kovového šrotu. Výsledná funkce popisující příjem zařízení EVO z provozu v r -tém roce při j -tém scénáři je tvaru:

$$P_r^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j) = P_{p,r}^j(\mathbf{x}^j) + P_{t,r}^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j) + P_{e,r}^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j) + P_{ke,r}^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j) + P_{s,r}^j(\mathbf{x}^j), \quad \forall j \in J. \quad (18)$$

Poslední faktor vstupující do nákladů mimo rovnice (17) je daňové zatížení. To se počítá z rozdílů výnosů a nákladů včetně odpisů počátečních investic. V modelu jsou daně státu označeny následovně:

$$N_{dan,r}^j = N_{dan,r}^j(\mathbf{x}^j, c; \mathbf{d}^j), \quad \forall j \in J. \quad (19)$$

Pro účelovou funkci, ve které maximalizujeme IRR , musí tedy být splněna podmínka vzniklá dosazením do (2).

$$\sum_{r \in R} \frac{\sum_{j \in J} p_j (P_r^j(\mathbf{x}^j; \mathbf{d}^j) - I_r(c) - N_r^j(\mathbf{x}^j, c) - N_{dan,r}^j(\mathbf{x}^j, c; \mathbf{d}^j))}{(1 + IRR)^r} = 0, \quad (20)$$

kde p_j udává pravděpodobnost scénářů poptávek po užitečném teple. Neurčitost v podobě poptávky po teple zásadně ovlivňuje výslednou optimální kapacitu [27]. Z tohoto důvodu se pro tento parametr uvažuje najednou více budoucích vývojų. Tento přístup zajišťuje robustnost řešení (kapacita zařízení EVO) pro jakýkoli uvažovaný scénář budoucího vývoje poptávky po teple. Analogicky se dá přistoupit i k ostatním parametrům vstupujícím do úlohy. $I_r(c)$ značí výši investice v r -tém roce. $I_r(c) = I(c)$, pro $r = 1$, pro ostatní roky ($r \neq 1$) jsou tyto náklady nulové. Použitelnost výpočtů je založena na kvalitním odhadu výše investičních nákladů. Ta musí brát v úvahu více variant z pohledu počtu linek v různých kapacitních řešeních. Odhad byl stanoven ze znalosti reálných projektů pro technologii uvedenou na obr. 11.

Klíčovou neznámou uvedeného modelu je cena na bráně (vstupuje do členu P_r^j v rovnici 18), za kterou budou ochotní producenti svůj odpad v zařízení EVO zpracovat. Ta závisí na součtu nákladů na dopravu a nákladu za zpracování. Odpověď na tuto otázku vyžaduje komplexní pohled na plánování OH v ČR. Z tohoto důvodu je vyvíjen výpočetní nástroj *NERUDA*, na němž se autor podílí. Úvodní model byl představen v [31]. Následoval systematický vývoj do podoby komplexního nástroje, který je představen v následující kapitole.

4. Výpočtový nástroj *NERUDA* – logistický problém plánování v oblasti odpadového hospodářství

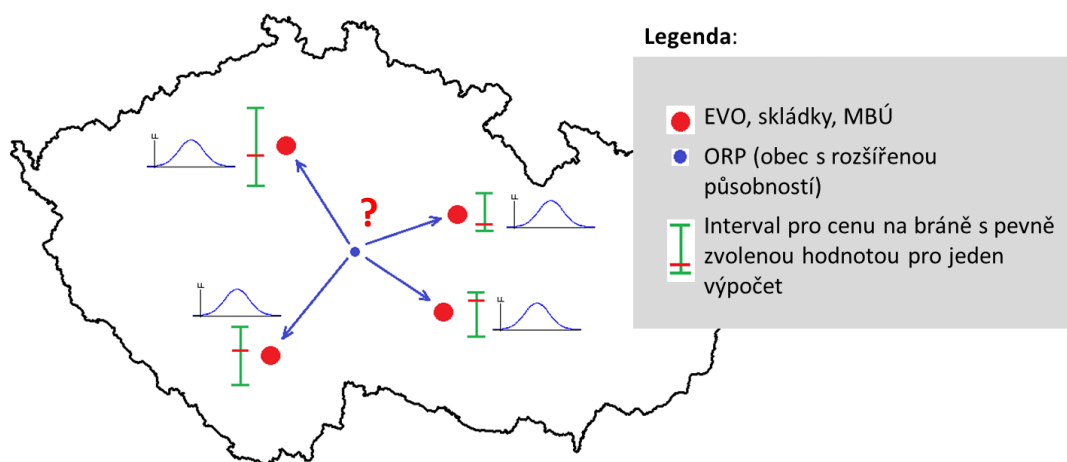
Efektivní plánování nových zařízení pro nakládání s odpady a související infrastruktury není možné bez znalosti budoucích cen na bráně, které zajistí ekonomickou rentabilitu jednotlivých projektů. Ta je výrazně spjata s legislativou a zavedením ekonomických nástrojů v oblasti OH a na jejich správném parametrickém nastavení. Vzhledem k obecně složitým vazbám se jedná o komplexní úlohu - intuicí obtížně řešitelnou. Oddělené posuzování jednotlivých projektů vytržených z kontextu okolí, bez respektování vzájemných interakcí mezi projekty, může vést k chybným závěrům a nereálným výstupům z úlohy. V takové situaci je nutné disponovat výpočtovým nástrojem, který se dotýká následujících bodů:

- Výběr vhodné lokality pro výstavbu zařízení a jeho optimální kapacity.
- Popis toku odpadu (materiálu) v rámci sledovaného území.
- Podpora návrhu logistického řetězce (svozová vozidla, překládací stanice, silniční a železniční doprava).
- Hodnocení atraktivity záměrů – dostupnost odpadu a očekávaná cena za zpracování.
- Podpora zavádění legislativních opatření.

4.1 Hlavní myšlenka výpočtového nástroje *NERUDA*

V rámci činnosti ÚPEI byl vyvinut komplexní optimalizační nástroj, který dává do souvislosti výše uvedené aktuální otázky a problémy. Jeho hlavní idea vychází z následujícího jednoduchého principu:

Vlastník odpadu (obec) se rozhoduje, jak s odpadem naloží, přičemž kritériem je dosažení nejnižší ceny. Ta je dána cenou za zpracování v daném zařízení (tzv. gate-fee) a cenou dopravy (resp. nezbytného logistického celku). Tato hlavní idea s podkladovou mapou ČR je zobrazena na obr. 17.



Obr. 17: Hlavní myšlenka nového výpočtového nástroje pro podporu plánování zařízení v oblasti OH

Z matematického pohledu se jedná o řešení tzv. svozové (logistické) úlohy spalitelných odpadů na území ČR do jednotlivých zařízení (existujících i potenciálních v budoucnu - EVO, MBÚ a skládky) schopných nakládat s KO. Území ČR je rozděleno do více než 220 bodů (dále jen *uzel modelu*), které popisují lokality na úrovni obcí s rozšířenou působností (ORP). Pro každý uzel jsou definovány potřebné vstupní a okrajové podmínky.

4.2 Matematický model nástroje *NERUDA*

V první řadě je vhodné uvést články, které se věnují problematice v dané oblasti s rozdílnými metodami řešení. K dispozici jsou inspirující texty, které se zabývají návrhem trvale udržitelných dodavatelských řetězců [38], problematikou energetických sítí v rámci regionů [39], popisy a simulacemi P-grafů [40] a více kritériální úlohou pro efektivní energetické využití biomasy [41]. Mezi užitečné zdroje týkající se logistických modelů patří [42] a pro techniky celočíselného programování [43]. Základní myšlenka řešené úlohy je založena na

plánování toků v síti (viz předchozí odkazy). Tato metoda je hojně využívána v celé řadě odvětví. Dále o problematice logistické optimalizace pojednává [44]. Souhrn používaných typů modelů při řešení ekonomických problémů pro nakládání s odpadem naleznete v krátkém přehledu [45].

Rozhodnutí týkající se konkrétního problému OH, vyžaduje speciálně upravený přepravní optimalizační model. Detailní popis použitých přístupů je blíže popsán u konkrétních aplikací v kap. 7. Klíčovou myšlenkou je analýza způsobů likvidace odpadů vyprodukovaných v obcích a městech (zdroje odpadu) a přibližně modelovat konkurenční prostředí. Zdroje odpadu (ORP) představují uzly grafu a silnice jsou reprezentovány hranami, viz obr. 20. Z matematického hlediska představuje nástroj *NERUDA* úlohu nelineárního stochastického programování (úlohu je možné linearizovat, nevýhodou jsou vzniklé celočíselné proměnné, viz kap. 4.5), spočívající v nalezení optimálních míst pro výstavbu zařízení EVO a určení vytíženosti hran v síti ČR tak, aby se minimalizovaly celkové náklady za dopravu a zpracování odpadu. O možném budoucím využití odpadu v energetice pojednává článek [46]. Problematikou síťových toků, lokalizací zařízení na zpracování odpadu a počtem těchto zařízení s využitím scénářů se také zabývá [47]. Neurčitost v modelu se uvažuje v cenových a kapacitních parametrech, které se generují náhodně z určeného pravděpodobnostního rozdělení. Tímto způsobem vznikají jednotlivé scénáře s různými parametry, pro které je úloha vždy vyřešena a tento postup je mnohokrát opakován. Na závěr se z těchto výsledků vyvozují závěry. Tomuto přístupu se říká metoda Monte Carlo, o které podrobně pojednává článek [48]. Jiným přístupem se zabývá článek [49], kde se využívá metod fuzzy lineárního programování. Řešení problému je zde hledán pomocí diskretizace fuzzy parametrů na konečný počet α -řezů nebo převedením na intervalové lineární programování a dále tuto metodu porovnávají s metodou Monte Carlo. V článku [50] je představena metoda, ve které se hledá robustní řešení úlohy stochastického intervalového lineárního programování pro podporu rozhodování v OH.

Matematický model nástroje *NERUDA*, kde se minimalizují celkové náklady na zpracování odpadů vhodných pro energetické využití, vypadá následovně.

Nejdříve je nutné nadefinovat použité množiny a jejich označení. Množinu uzlů (ORP, zařízení EVO, MBÚ, skládky) udávají prvky $i \in I$. Množinu silničních hran udávají prvky $j \in J$. Množina $k \in K$ označuje železniční hrany.

Vstupní parametry v úloze:

a_{ij}	incidenční matice pro silniční síť (SKO, LF a slisované SKO - SLIS), [-]
b_{ij}	incidenční matice pro rozvoz TF, [-]
c_{ik}	incidenční matice pro rozvoz SKO po železnici, [-]
p_i^{EVO}	poplatek za zpracování SKO v zařízení EVO, [Kč/t]
p_i^{SKL}	poplatek za skládkování SKO, [Kč/t]
p_i^{MBU}	poplatek za zpracování SKO v zařízení MBÚ, [Kč/t]
p_i^{PREKL}	poplatek za slisování SKO v překládací stanici, [Kč/t]
d	cena za přepravu SKO po silnici, [Kč/km.t]
e	cena za přepravu LF po silnici, [Kč/km.t]
g_k	cena za přepravu SKO po železnici, [Kč/km.t]
h_k	náklady na manipulaci s SKO pro přepravu po železnici, [Kč/t]
v_j	délka silniční hrany (vzdálenost uzlů, které spojuje), [km]
w_k	délka železniční hrany (vzdálenost uzlů, které spojuje), [km]

o_i	produkce SKO, [t]
δ_i^{EVOSKL}	1, když je uzel typu skládka nebo obec s EVO, jinak 0
δ_i^{SKL}	1, když je uzel typu skládka, jinak 0
δ_i^{MBU}	3,33, když je uzel typu obec s možnou výstavbou zařízení MBÚ, jinak 0; koeficient 3,33 udává množství vyrobené LF vůči zpracovanému SKO
δ_i^{PREKL}	1, když je uzel typu obec s možnou výstavbou překládací stanice, jinak 0.

Seznam proměnných v úloze:

x_j	množství SKO převážené po silnici, [t]
y_k	množství SKO převážené po železnici, [t]
s_j	množství slisovaného SKO (SLIS) převážené po silnici, [t]
l_j	množství LF převážené po silnici, [t]
t_j	množství TF převážené po silnici, [t]
C_i^{EVO}	kapacita zařízení EVO, [t]
C_i^{SKL}	kapacita skládky, [t]
C_i^{MBU}	kapacita zařízení MBÚ, [t]
C_{max}^{PREKL}	maximální kapacita překládací stanice, [t]
C_i^{ZLF}	kapacita ZLF, [t].

Matematický model popisované úlohy vypadá následovně:

Účelová funkce udávající veškeré náklady spojené s nakládáním se zbytkovým spalitelným odpadem je tvaru:

$$\min \sum_j d v_j x_j + \sum_j e v_j l_j + \sum_j f v_j s_j + \sum_k g_k w_k y_k + \sum_i p_i^{SKL} \sum_j a_{ij} (x_j + s_j) + \sum_i p_i^{EVO} (C_i^{EVO}) \cdot (\sum_j a_{ij} (x_j + s_j) + \sum_k c_{ik} y_k) + \sum_i \delta_i^{MBU} p_i^{MBU} (C_i^{MBU}) \cdot \sum_j a_{ij} l_j - \sum_i \delta_i^{PREKL} p_i^{PREKL} (C_i^{PREKL}) \cdot \sum_j a_{ij} s_j + \sum_k h_k y_k, \quad (21)$$

za předpokladu následujících omezení (omezení platí pro všechny uzly i a hrany j a k). První omezení limituje kapacitu zařízení EVO a skládky pro odpad dovezeny po silnici a železnici. Do jednotlivých zařízení se nepřiveze více, než je zpracovatelská kapacita.

$$\delta_i^{EVOSKL} (\sum_j a_{ij} (x_j + s_j) + \sum_k c_{ik} y_k) \leq C_i^{EVO} + C_i^{SKL}, \quad \forall i \in I. \quad (22)$$

Další vztah uvádí bilanční rovnici pro silniční síť a obec. Vyrovnáním bilance je získáno množství odpadu, který se přesune na železnici.

$$\delta_i^O (\sum_j a_{ij} (x_j + s_j) + o^i + \delta_i^{MBU} (\sum_j a_{ij} l_j + \sum_j b_{ij} t_j) + \delta_i^{PREKL} (\sum_j a_{ij} s_j) - r_i) = 0, \quad \forall i \in I. \quad (23)$$

Podobně je zavedena i bilanční rovnice pro železniční síť a obec. V obci nezůstane žádný odpad, vše, co se neodvezlo po silnici, musí být odvezeno po železnici.

$$\delta_i^O (\sum_k c_{ik} y_k + r_i) = 0, \quad \forall i \in I. \quad (24)$$

Následuje kapacitní omezení pro zařízení MBÚ. Nepřiveze se více odpadu do zařízení MBÚ, než je jeho kapacita.

$$\sum_j a_{ij} l_j \leq C_i^{MBU}, \quad \forall i \in I. \quad (25)$$

Další omezení se týká výroby a následného transportu LF. Nepřiveze se více LF, než je kapacita zařízení pro její zpracování. Toto omezení limituje i celkovou produkci LF.

$$-\delta_i^{MBU} \sum_j a_{ij} l_j \leq C_i^{ZLF}, \quad \forall i \in I. \quad (26)$$

Následující omezení zajišťuje, aby se do zařízení zpracovávající LF (ZLF) nedovážel SKO (slisovaný i neslisovaný).

$$\delta_i^{ZLF} \left(\sum_j a_{ij} (x_j + s_j) \right) = 0, \quad \forall i \in I. \quad (27)$$

V obcích nesmí přebývat slisovaný SKO, což je zajištěno rovnicí (28). Neslisovaný SKO přebývat může, protože je možné v obcích postavit překládací stanici (PREKL).

$$\delta_i^O \sum_j a_{ij} s_j \leq 0, \quad \forall i \in I. \quad (28)$$

Další omezení se týká skládek. Na skládky (SKL) se nesmí dovážet slisovaný SKO. Vznik PREKL se uvažuje pouze z důvodu vzniku nových zpracovatelských kapacit zařízení EVO.

$$\delta_i^{SKL} \sum_j a_{ij} s_j \leq 0, \quad \forall i \in I, \quad (29)$$

Bilanční omezení zajišťující pro zařízení MBÚ požadovaný poměr vzniklé LF a TF je uvedeno v rovnici (30). V modelu se uvažuje 30 % LF, 30 % TF a zbytek je uvolněn v průběhu procesu (v průběhu fermentace dochází k uvolnění vody a jiných složek). Jedná se o asi 35 % z celkového množství vstupního SKO. Zbytek tvoří vytříděné kovy.

$$\delta_i^{MBU} \sum_j a_{ij} l_j = \delta_i^{MBU} \sum_j b_{ij} t_j, \quad \forall i \in I. \quad (30)$$

Kapacitní omezení SKL pro odpad dovezený po silnici (s dopravou po železnici se v modelu neuvažuje) je uvedeno v rovnici (31). Nepřiveze se více odpadu, než je uvažovaná kapacita SKL.

$$\delta_i^{SKL} \sum_j a_{ij} (x_j + s_j) + \sum_j b_{ij} t_j \leq C_i^{SKL}, \quad \forall i \in I. \quad (31)$$

Poslední omezení se týká kapacity PREKL pro odpad dovezený po silnici (v případě železnice je uvažován přímý transport do zařízení EVO).

$$\delta_i^{PREKL} \sum_j a_{ij} s_j \leq C_{max}^{PREKL}, \quad \forall i \in I. \quad (32)$$

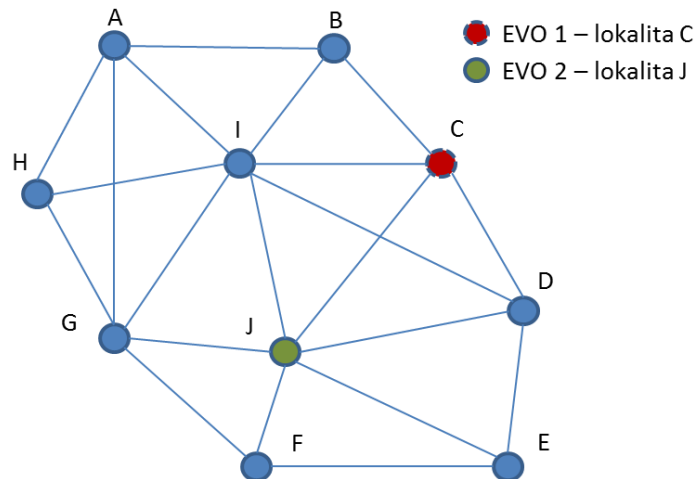
4.3 Princip výpočtu – zjednodušená úloha

S cílem zajistit snadný vhled do modelu bude ukázán nejprve princip výpočtu na zjednodušené úloze, ve které je uvažován pouze malý počet uzlů a hran (10 uzlů, 21 hran) a nebere se v úvahu možnost zpracování odpadů v zařízeních MBÚ nebo jeho skládkování. V úloze vystupují pouze dvě zařízení EVO (uzly C a J, viz obr. 18), které mají pevnou roční zpracovatelskou kapacitu 300 kt/r. Celková kapacita 600 kt/r je mírně vyšší než celkové produkce ve všech vybraných uzlech A až J, 570 kt/r (viz tab. 2). Poplatek na bráně je konstantní (není závislý na kapacitě) a činí 2000 Kč/t pro zařízení v uzlu C a 2200 Kč/t pro zařízení v uzlu J. Účelová funkce a všechna omezení jsou lineární. Z tohoto důvodu je

zaručeno nalezení globálního extrému. Obr. 18 představuje dopravní síť s příslušnými údaji pro tuto zjednodušenou optimalizační úlohu. Produkce odpadu v jednotlivých uzlech je uvedena v tab. 2.

Tab. 2: Produkce odpadu uvažovaná v zjednodušené úloze

Uzly	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Produkce odpadu [kt/r]	50	80	85	55	75	45	35	70	35	40



Obr. 18: Dopravní síť zjednodušené úlohy

Je uvažováno pouze se silniční dopravou a její cena je konstantní bez ohledu na vzdálenost, konkrétně je zvoleno 4 Kč/km.t. Komprese odpadu v překládacích stanicích a příslušné snížení nákladů na přepravu nejsou v této úloze uvažovány. Údaje vztahující se k modelu infrastruktury jsou shrnuty v tab. 3.

Tab. 3: Definice dopravní sítě pro zjednodušenou úlohu – matice vzdáleností

Hrany definované uzly	A	A	A	A	B	B	C	C	C	D	D	D	E	E	F	F	G	G	G	H	I
	B	G	H	I	C	I	D	I	J	E	I	J	F	J	G	J	H	I	J	I	J
vzdálenost [km]	30	42	25	25	25	23	28	28	38	26	40	34	35	34	27	20	25	34	25	29	33

Matematický model je zjednodušen na následující účelovou funkci (33) a jedno omezení (34).

$$\min \sum_j d v_j x_j + \sum_i \sum_j a_{ij} x_j p_i^{EVO}, \quad \forall i \in I, \quad (33)$$

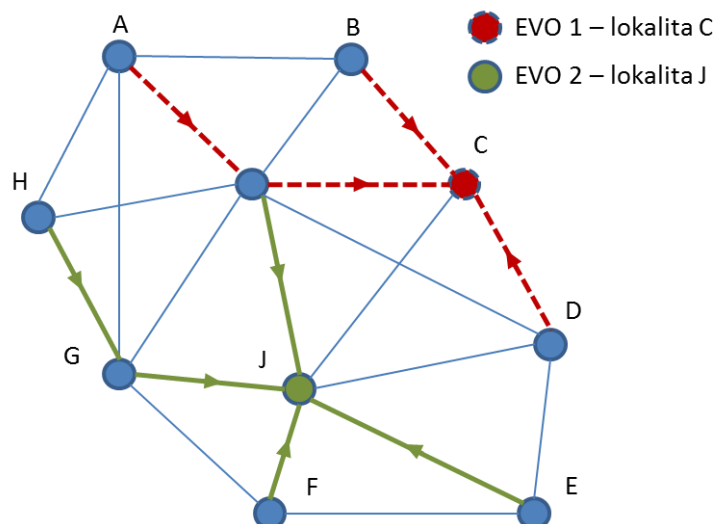
za předpokladu, že:

$$\sum_j a_{ij} x_j + o_i \leq C_i^{EVO}, \quad \forall i \in I. \quad (34)$$

Díky jednoduchosti úlohy mohou být výsledky snadno kontrolovány a je tedy možné ověřit platnost matematického modelu. Výsledky zjednodušené úlohy jsou uvedeny na obr. 19 a v tab. 4.

Tab. 4: Výsledky zjednodušené optimalizační úlohy

Hrany definované uzly	A	A	A	A	B	B	C	C	C	Uzly s zařízením EVO	C	J
	B	G	H	I	C	I	D	I	J			
Roční přepravní kapacita [kt/r]	30	42	25	25	25	23	28	28	38	Zpracovatelská kapacita [kt/r]	300	270



Obr. 19: Grafická reprezentace výsledků zjednodušené optimalizační úlohy

Je zřejmé, že při reálné situaci, kdy je třeba optimalizovat stovky uzlů současně s nezbytnými nelineárními vztahy, je ověření výsledků v podstatě nemožné. Taková situace je prezentována v kap. 7.

4.4 Vstupy a okrajové podmínky výpočtu pro aplikaci modelu na území ČR

Vstupní parametry jsou uvažovány pro plánování OH v ČR. V souladu s reálnými okrajovými podmínkami úloha vyžaduje následující vstupy:

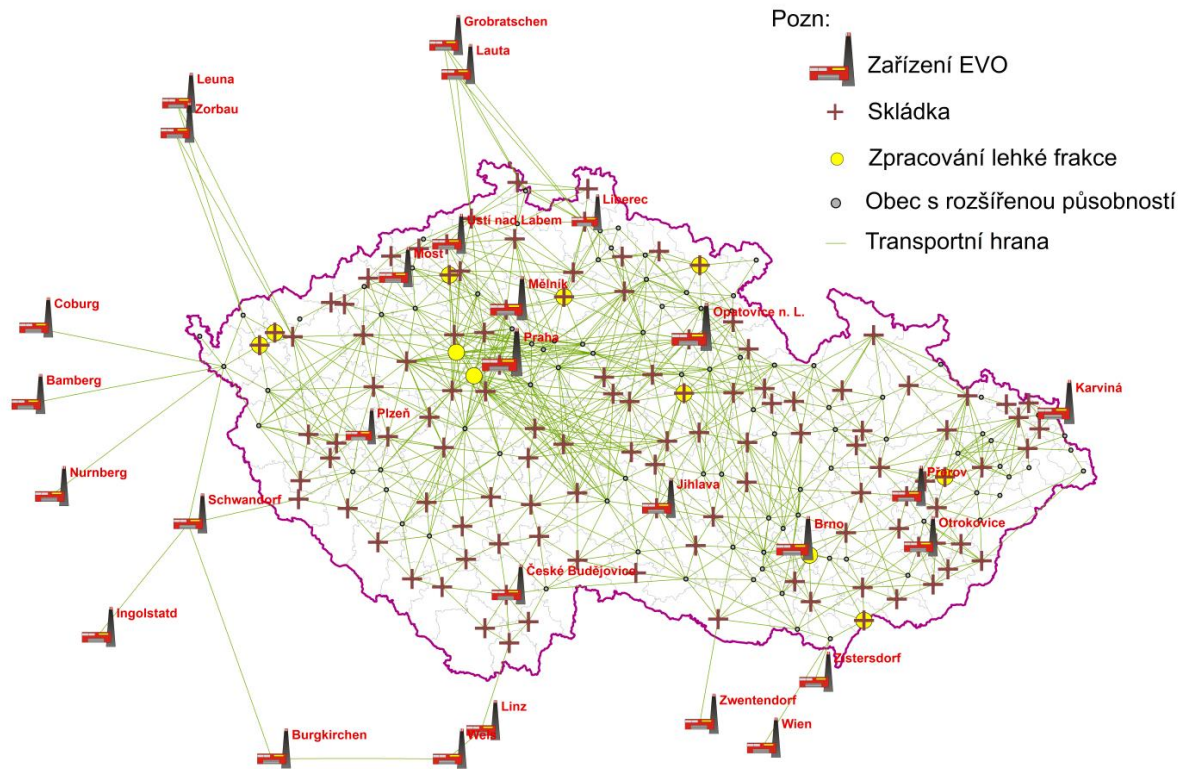
- 1) Popis existující dopravní infrastruktury (silniční, případně železniční síť) mezi jednotlivými uzly a vzdálenosti dopravních úseků (existence spojnic silniční sítě v ČR mezi jednotlivými body je patrná z obr. 20, železniční síť je zobrazena na obr. 21).
- 2) Informace o zařízeních definující konkurenční prostředí mezi zpracovateli SKO (zařízení jsou zobrazeny na obr. 20):
 - Existující skládky kategorie OO. Informace byly čerpány z [32].
 - Existující zařízení EVO (ZEVO Malešice, TERMIZO Liberec, SAKO Brno), připravované projekty (zejména ZEVO Chotíkov u Plzně a EVO Most – Komořany) a možné další lokality pro výstavbu EVO a jejich kapacitní řešení (viz výstup studie [20], popř. další studie).
 - Informace o připravovaných zařízeních MBÚ a nezbytných koncovkách pro energetické využití LF. Potenciální vznik zařízení MBÚ může být uvažován v libovolném uzlu, přičemž jsou primárně preferována místa existujících skládek OO. Jejich kapacita musí být dostatečná pro uložení odpadního proudu z MBÚ (podsítné frakce). Protože proces MBÚ představuje pouze mezičlánek celého řetězce, pro vzniklou výhřevnou frakci musí existovat zdroj, který je schopný tento produkt bezpečně a šetrně zpracovat. Přehled provozů, které deklarují

schopnost spalovat kalorické výstupy z MBÚ, lze nalézt v [20]. Aktualizaci dat pro konkrétní subjekt uvádí [33]. V souladu se závěry studie [20] a článkem [34] je chápán proces MBÚ jako doplňkový, vytváří nesystémové řešení pro plošnou aplikaci v podmínkách ČR.

- S ohledem na existující trh s odpadem v rámci zemí západní Evropy je vhodné uvažovat možný export odpadu do příhraničních zemí (převážně do Německa a Rakouska). V těchto zemích je u některých zařízení patrná nadkapacita. Ta se může ještě navyšovat vlivem snižování vlastní produkce odpadů vhodných pro energetické využití (např. vlivem vyšší míry separace) nebo snížením toku odpadu z jiných zemí – např. vlivem výstavby nových kapacit v UK.
 - Pro efektivní dopravu (snížení dopravních nákladů) se často využívá tzv. překládacích stanic, kde je možné odpad například slisovat do kontejneru pro následný transport do místa zpracování. V této práci je výstavba překládací stanice možná v libovolném uzlu (ORP). Výsledné rozhodnutí o výstavbě a zpracovatelské kapacitě je výstupem z výpočtů.
- 3) Statistické informace z oblastí KO a výhledy pro jednotlivé uzly:
- měrná produkce odpadů, efektivita systému tříděného sběru, výhřevnost odpadu, socio-ekonomické parametry apod.
- 4) Cenové modely, výhledy a predikce:
- dopravní náklady na svoz po silnici popř. po železnici,
 - ceny energií – teplo v jednotlivých lokalitách, elektřina,
 - množství využitelného tepla do sítě CZT v jednotlivých lokalitách,
 - nastavení zpracovatelských poplatků na bráně zařízení EVO, MBÚ a překládacích stanic - vychází z T-E modelů (viz [28]). Potřebné modely, vstupní data a okrajové podmínky pro výpočty se neustále zpřesňují v součinnosti se subjekty věnujícími se dané problematice na národní i mezinárodní úrovni.

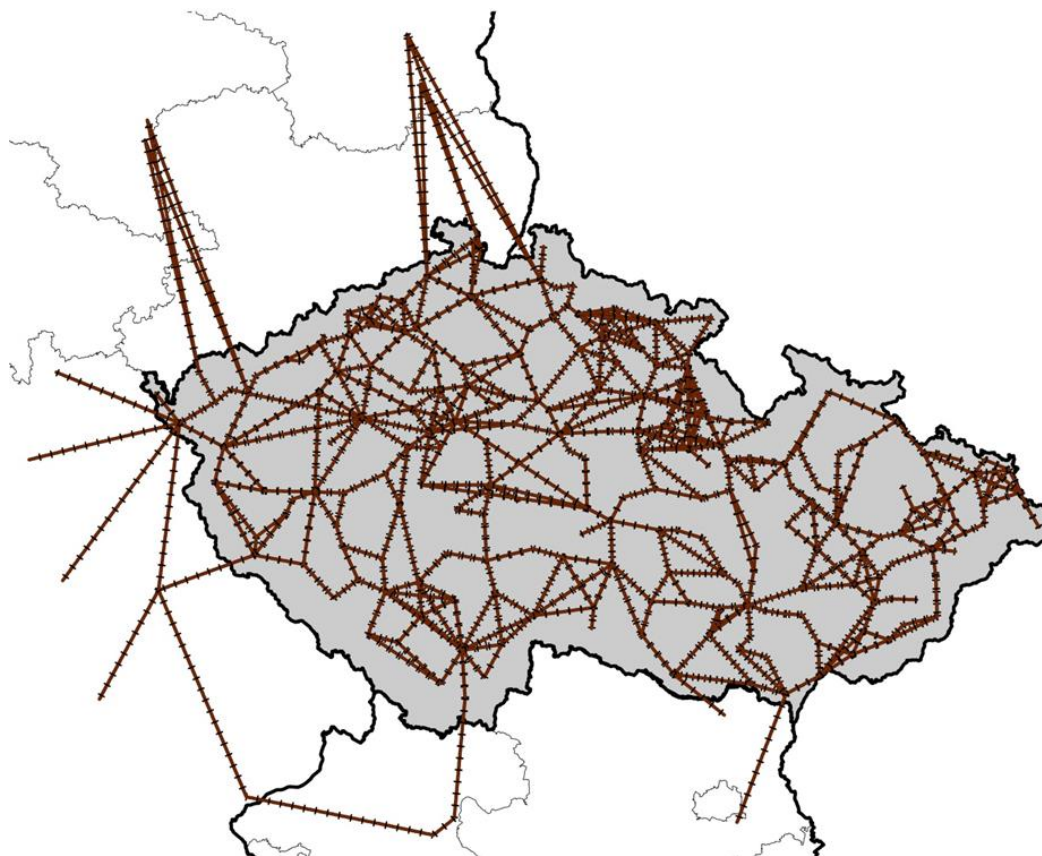
4.4.1 Silniční a železniční infrastruktura

Silniční hrany propojují jednotlivé uzly, které představují agregovanou oblast spadající pod ORP. Do této obce je umístěn reprezentativní uzel. Každá hrana je popsána dvěma uzly (počáteční a koncový) a vzdáleností. Dále je uvažováno s poměrnou vzdáleností, kde je placeno mýto. Silniční síť je tvořena dálnicemi, silnicemi I. a II. třídy. Silniční infrastruktura včetně uvažovaných projektů pro nakládání s odpady je uvedena na obr. 20.



Obr. 20: Rozdělení území do uzlů, dopravní (silniční) infrastruktura modelu a klíčové prvky systému

Jinou formou dopravy odpadu do místa zpracování je využití železnice. Ta může být účinná v případě omezené přepravy po silnici – nedostatečná infrastruktura. Případně může být vynucena z důvodu šetrnějšího chování k životnímu prostředí. Příkladem je zařízení ve Schwandorfu (Bavorsko), kde je podmínkou asi 90% návoz odpadu po železnici. Uvažovaná železniční síť je zobrazena na obr. 21.



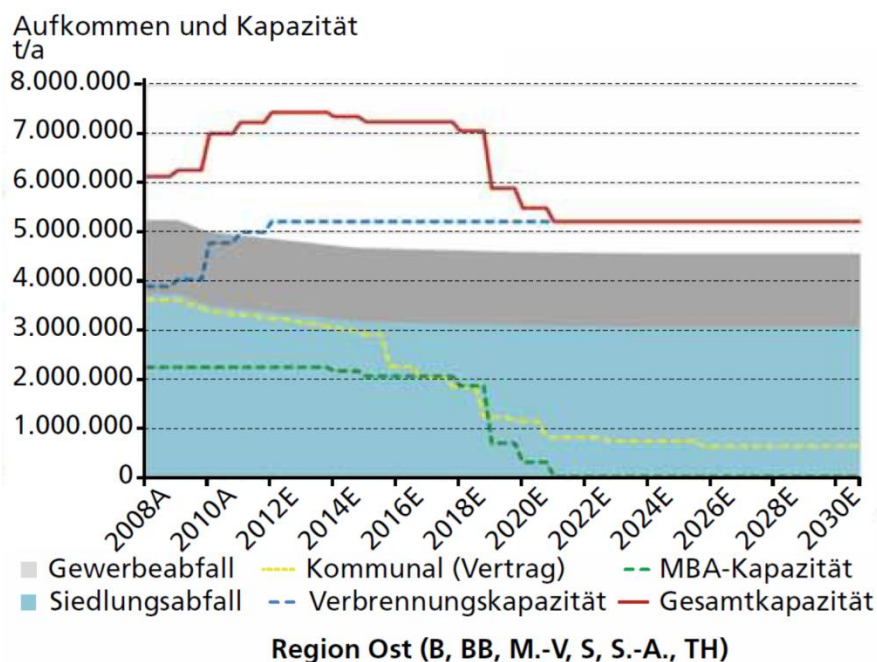
Obr. 21: Železniční síť ČR a spojení se zařízeními EVO v sousedních státech

4.4.2 Zpracovatelský potenciál SKO v Německu a Rakousku

V rámci sledování trhu s odpadem v Evropě byl identifikován potenciální export nezanedbatelného množství odpadů k jejich energetickému využívání do zahraničí (Německo, Rakousko). V těchto zemích se projevuje mírná nadkapacita zařízení pro termické zpracování a otázka importu odpadu je hojně diskutována v rámci odborných kruhů.

Vzhledem k vysoké citlivosti udržitelnosti projektů EVO v ČR na situaci v zahraničí, je předmětem této práce příprava modelů, které umožní modelovat tok odpadu v rámci území přesahující hranici jednoho státu. Tato modifikace nástroje *NERUDA* je označena jako *NERUDA EU* (více v kap. 8).

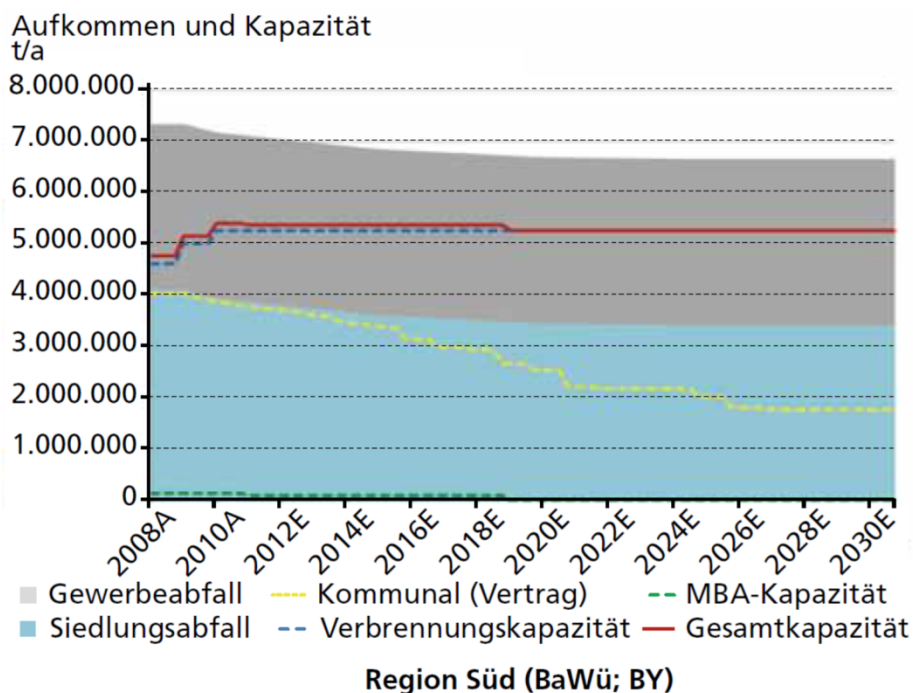
Význam modelování toku odpadu mezi sousedními státy je patrný z následujících grafů (obr. 22 a obr. 23), které definují jeden z možných scénářů vývoje nadkapacity v těchto regionech.



Pozn.: aufkommen und kapazität – objem a kapacita; siedlungsabfall - komunální odpad (z domácností - obecní); gewerbeabfall –živnostenský odpad; kommunal (Vertrag) - obecní (smluvně vázaný); verbrennung kapazität – kapacita v zařízení EVO; MBA-kapazität – kapacita v zařízení MBÚ; gesamtkapazität – celková kapacita.

Obr. 22: Výhled produkce odpadů a zpracovatelských kapacit v regionu východního Německa [35]

V regionu východního Německa je patrná významná nadkapacita v následujících letech. Tato nadkapacita by se měla kolem roku 2020 snižovat v důsledku útlumu kapacit (dožívajících) projektů MBÚ. Jak vyplynulo z osobních jednání se zástupci provozovatelů, je navíc značným problémem pro zařízení EVO proměnlivost produkce odpadu v roce (v letních obdobích je produkce významně vyšší). Tento efekt může být dán živnostenským a průmyslovým odpadem, který je ovlivněn sezonností jednotlivých odvětví (především ve stavebnictví). Proto by bylo pro tato zařízení EVO ekonomicky výhodné nasmlouvat si odpady z domácností (SKO produkující obce) z ČR na delší období. Na jihu Německa (z našeho pohledu je především významné Bavorsko) není situace s nadkapacitou tak vážná. I zde je ale tato problematika znatelná (viz obr. 23). Trh v celé západní Evropě se bude výrazně měnit vlivem výstavby nových zařízení, především ve Velké Británii. Ta dnes exportuje velké množství odpadu do kontinentální Evropy (v roce 2013 1,6 mil. tun). V okamžiku dokončení projektů EVO ve Velké Británii, se může redukovat import odpadu do těchto zemí, což může zvýšit nadkapacitu v Německu.



Pozn.: aufkommen und kapazität – objem a kapacita; siedlungsabfall - komunální odpad (z domácností - obecní); gewerbeabfall – živnostenský odpad; kommunal (Vertrag) - obecní (smluvně vázaný); verbrennung kapazität – kapacita v zařízení EVO; MBA-kapazität – kapacita v zařízení MBÚ; gesamtkapazität – celková kapacita.

Obr. 23: Výhled produkce odpadů a zpracovatelských kapacit v jižním Německu [35]

4.4.3 Produkce spalitelných odpadů

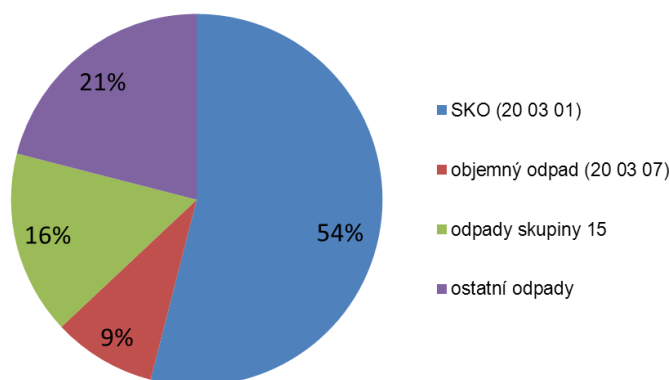
S aplikací nástroje se pojí potřeba analyzovat nejnovější dostupná data o produkci odpadů. Příklad takového postupu ukazuje následující text. Pro odhad produkce vybraných odpadů byla použita tzv. přepočtená (pracovní) databáze Informačního systému odpadového hospodářství (PDISOH). Analýza produkce vybraných odpadů zahrnovala období 2008 až 2012. Sestava vstupních dat byla ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu (MPO) a Ministerstvem životního prostředí (MŽP) poskytnuta organizací CENIA. Vlastní metodika byla navržena organizací CENIA dle předloženého zadání a specifikace cílů následného použití.

Přepočtení databáze za uvedené roky byl proveden podle platné metodiky *Zpracování matematického vyjádření výpočtu „soustavy indikátorů OH“*, viz [36]. Dupočtená produkce odpadů byla agregovaná tak, že nejnižší územní jednotkou pro dupočet je ORP. Množství produkce odpadů od všech dupočtených subjektů z jednotlivých území se po dupočtu zobrazí v produkci ORP, konkrétně na základní územní jednotce města, ve kterém má daná ORP sídlo (uzel výpočtu).

Výpočet produkce jednotlivých kódů odpadů se řídí metodikou *Zpracování matematického vyjádření výpočtu „soustavy indikátorů OH“* pro daný ohlašovací rok. Podle platné metodiky byly v jednotlivých letech (2008 - 2012) pro výpočet produkce odpadů standardně používány

kódy nakládání A00, AN60 a BN30 (partner občan obce) a tento způsob výpočtu byl zvolen i pro data, která byla podkladem pro tvorbu Statní energetické koncepce (SEK) v roce 2013. Produkce odpadu byla generována jednotně pro všechny roky podle požadavku autora. Jednotný postup pro výpočet produkce ve všech letech byl zvolen z důvodu potřeby získání konzistentní časové řady, která bude vytvořena na základě obdobně zadaných podmínek a parametrů a bude lépe a přesněji popisovat sledovaná data.

Sestava byla vygenerována pro vybraná katalogová čísla odpadů. Při sestavování jejich seznamu se vycházelo z katalogových čísel odpadů, které jsou zahrnuty v seznamu přijímaných odpadů v existujících zařízeních EVO v souladu s jejich provozními řády. Sestava byla následně zpracována. V následujícím textu je uveden souhrn podstatných výstupů. Celková produkce všech katalogových čísel v roce 2012 činila asi 5 400 kt. Podíly jednotlivých složek na produkci v roce 2012 jsou znázorněny na obr. 24.

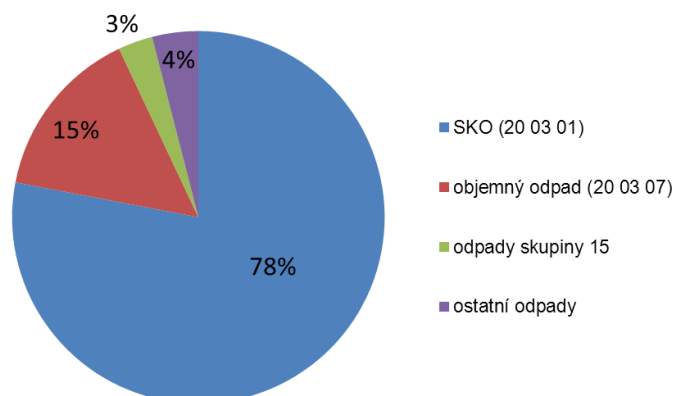


Obr. 24: Podíly zbytkových spalitelných odpadů na celkové produkci v roce 2012

Nejvýznamnější složkou v roce 2012 s přibližně 54 % podílem na celkové produkci na území ČR je dle očekávání SKO. Další významné složky jsou: objemný odpad (k. č. 200307 - asi 9 %), papírové a lepenkové obaly (k. č. 150101 - asi 11 %) a papír a lepenka (k. č. 200101 - asi 7 %). Ostatní složky se podílejí na celkové produkci řadově do 2 %. V analyzovaných letech 2008 až 2012 se poměry jednotlivých složek lišily okolo 5 % svého podílu. Změny nevykazují trend, jedná se zřejmě o náhodné meziroční změny bez viditelné závislosti.

Pro stanovení potenciálu spalitelných odpadů na území ČR jsou rozhodující složky odpadů sbíraných v rámci kolektivních systémů (skupina 20). Odpady z průmyslové sféry mají minoritní význam.

Podstatnou informací je, jakým způsobem je s vyprodukovanými složkami KO dále nakládáno. Z pohledu možného budoucího energetického využití lze do potenciálu zahrnout pouze odpady, pro které není žádné opětovné využití, a které se odstraňují ukládáním na skládky. Na obr. 25 je zobrazeno složení odpadu, který byl skládkován v roce 2012 (celkem 2 910 kt/r).

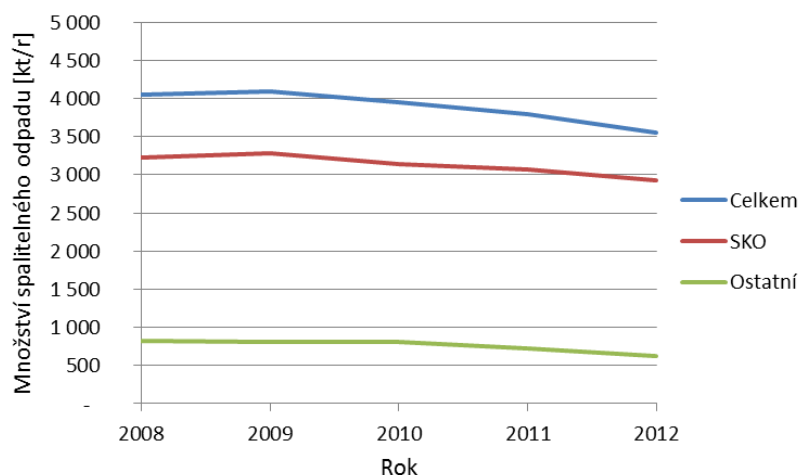


Obr. 25: Složení zbytkových spalitelných odpadů skládkovaných v roce 2012

Hlavní složku odpadů odstraněných skládkováním opět tvoří SKO – asi 78 % z celku. Druhou významnou složkou je objemný odpad (k. č. 200307 – asi 15 %, což představuje přibližně 90 % z celkové produkce). Dále se jedná o směsné obaly (k. č. 150106 – asi 3 %) a jiné odpady (včetně směsí materiálů) z mechanické úpravy odpadu neuvedené pod číslem 19 12 11 (k. č. 191212 – asi 1 %). Ostatní složky měly zanedbatelný vliv na množství skládkovaných odpadů v roce 2012. I zde jsou poměry přibližně stejné pro všechny uvažované roky bez známky závislosti (trendu).

Analýza potvrdila, že nejpodstatnější složkou odpadů vhodných pro energetické využití je SKO. Množství ostatních složek, které jsou potenciálně vhodné pro energetické využití, je dáno neexistencí jejich jiného uplatnění – v současné době se skládkují. Tyto složky vzhledem k jejich minoritnímu podílu budou uvažovány v souhrnné formě. Dopočtené produkce zbytkových spalitelných odpadů z let 2008 až 2012 jsou zobrazeny na obr. 26.

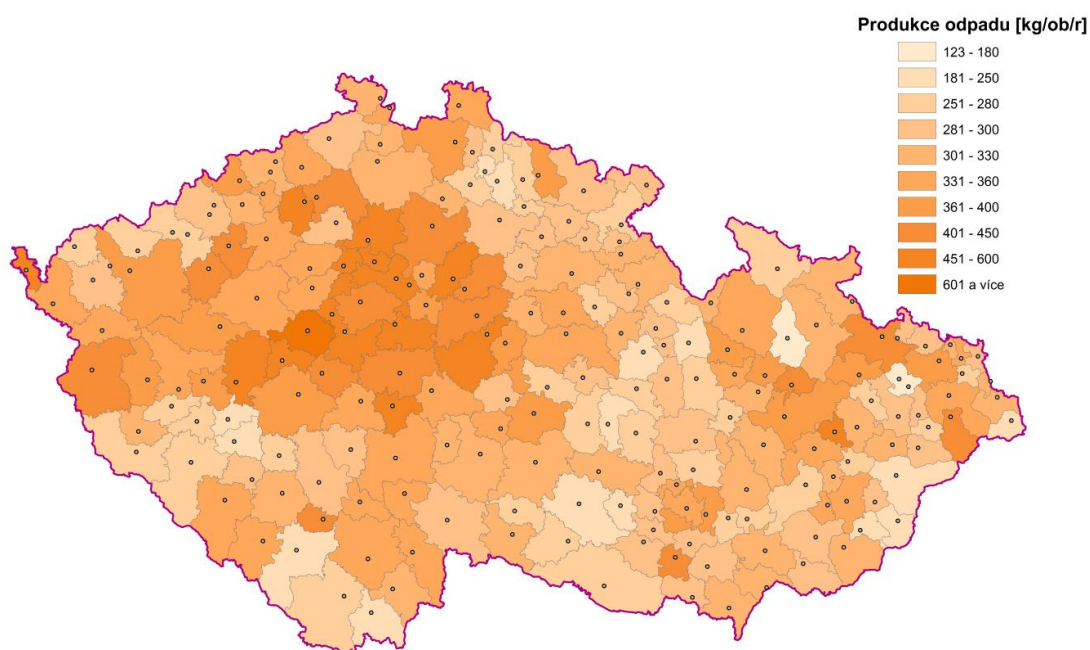
Spalitelnými odpady pro účely této práce rozumíme veškerou produkci SKO (k. č. 200301) a dále tu část z ostatních složek KO a dalších svou povahou spalitelných odpadů, které nenachází žádné materiálové uplatnění a byly v roce 2012 a letech předchozích odstraněny skládkováním. Odhad množství spalitelných odpadů mimo SKO se dopočítával pro jednotlivé ORP. Z celkového množství vyprodukovaných zbytkových spalitelných odpadů, s výjimkou SKO, se v roce 2012 přibližně 25 % uložilo na skládku. Tento odpad bude dále označen jako *ostatní*.



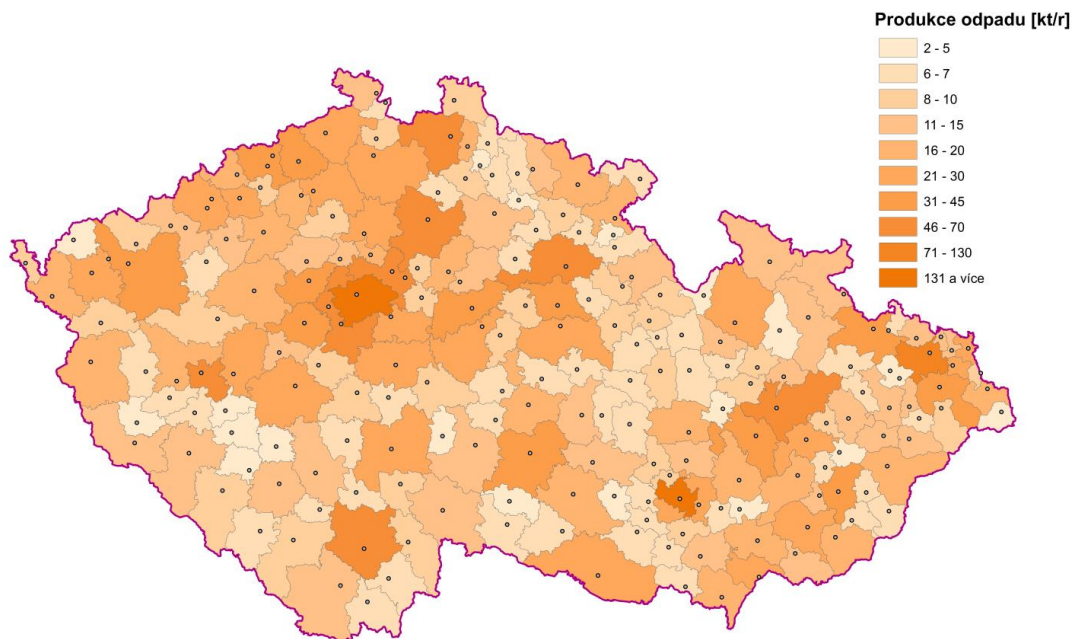
Obr. 26: Vývoj produkce odpadů vhodných pro energetické využití

Referenční hodnota v roce 2013 pro množství zbytkových spalitelných odpadů byla na základě existujících trendů vypočítána na 3 475 kt/r. Tato hodnota vznikla jako součet produkci zbytkových spalitelných odpadů v jednotlivých ORP. V každé ORP byl odhad proveden na základě historických dat (trendu) v letech 2008 až 2012 (viz výše).

Extrapolace do dalších let je tvořena na základě vytyčených cílů jednotlivých úloh. Odhady mohou být provedeny pro všechny ORP jednotně (bez uvažování rozdílů v demografickém vývoji nebo odlišných trendů v dalších socioekonomických faktorech), případně lze ke každé ORP přistoupit detailně. Získané hodnoty pak mohou vstoupit do optimalizačních úloh. Odhad současné produkce odpadů vhodných pro energetické využití v jednotlivých ORP přepočtené na obyvatele je na obr. 27, celková produkce v ORP je na obr. 28.



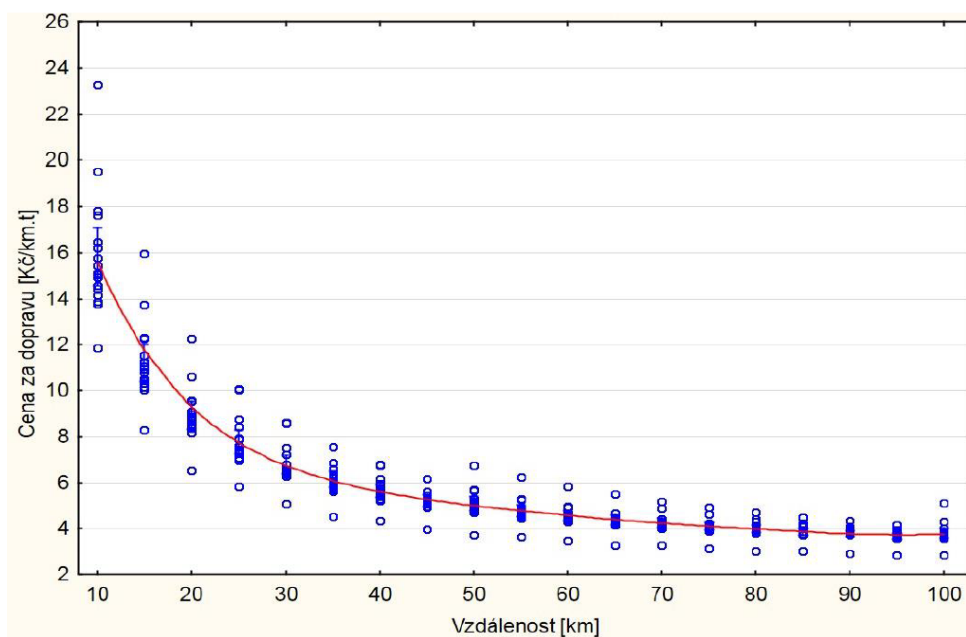
Obr. 27: Měrná produkce odpadů vhodných pro energetické využití [kg/ob. a rok]



Obr. 28: Produkce odpadů vhodných pro energetické využití [kt/r]

4.4.4 Dopravní náklady

Dopravními náklady na svoz SKO (a ostatních spalitelných odpadů) se detailně zabývala diplomová práce [37]. Jako hlavní faktory, ovlivňující jednotkovou cenu dopravy (Kč/t.km), byly identifikovány dopravní vzdálenost a celkové přepravované množství (roční přepravní kapacita). Ukázka dopravních nákladů v závislosti na vzdálenosti přepravy pro nelisovaný odpad je na obr. 29, převzato z [37]. Nastavení cen za dopravu v úlohách popsaných v této práci bylo voleno na základě konkrétních cílů a okrajových podmínek jednotlivých úloh.



Obr. 29: Závislost jednotkové ceny za přepravu na přepravní vzdálenosti [37]

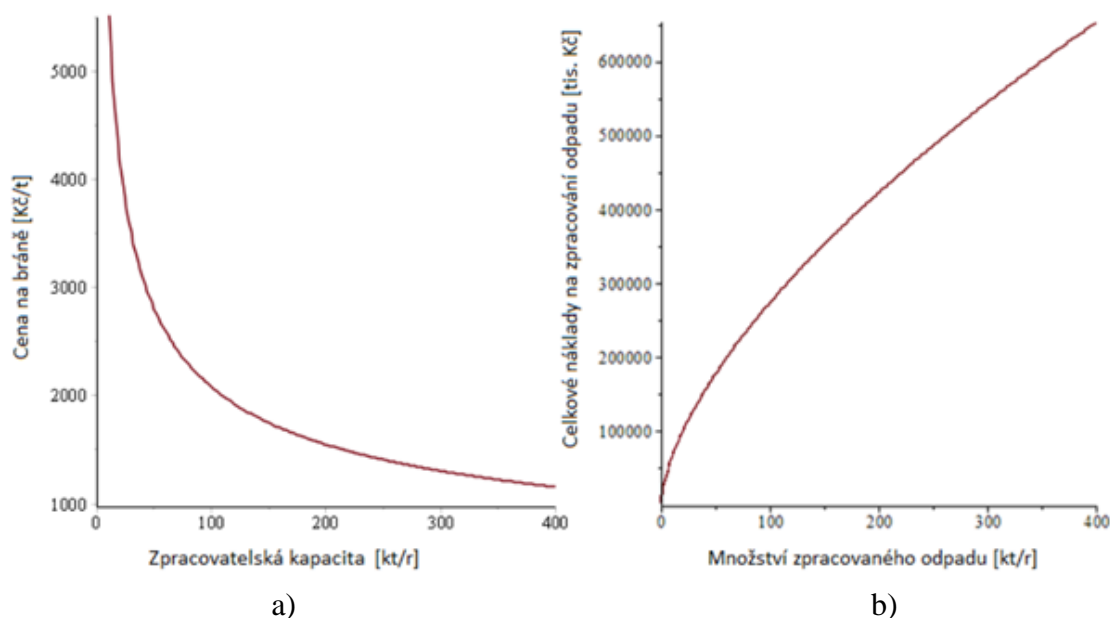
4.5 Linearizace úlohy

Pro modelování reálné situace je nutné řadu dějů popsat pomocí nelineárních závislostí. Ty mohou nepříjemně zkomplikovat řešení úlohy. Pokud nesplníme konvexnost u množiny přípustných řešení nebo účelové funkce, není možné zaručit nalezení globálního extrému. Z tohoto důvodu je velmi často snaha, pokud je to možné, o lineární aproximaci složitějších vztahů. V našem případě jde o cenovou funkci, která dává do souvislosti zpracovatelskou kapacitu a cenu na bráně, za kterou zařízení EVO zpracuje přivezený odpad (viz obr. 30a). Zařízení EVO s vyšší kapacitou může zpravidla nabídnout nižší jednotkovou cenu na bráně z důvodu klesajících měrných investičních nákladů. Záleží také na lokalitě, resp. na množství využitelného tepla a jeho ceně. S ohledem na velké množství prvků s takovou funkční závislostí (EVO, MBÚ, překládací stanice), je nalezení globálního extrému této úlohy značně komplikované. Proto je zavedena následující linearizace, která aproximuje cenové funkce pomocí několika přímkami (po částech lineární funkcí) a pomocí váhové proměnné přepíná mezi jednotlivými přímkami podle množství přivezeného odpadu.

Pro lepší vzhled je uveden příklad pro cenovou funkci u zařízení EVO. Tato cenová funkce, která vyjadřuje náklady na zpracování odpadu v konkrétním zařízení, je součástí rovnice (21) a je tvaru:

$$p^{EVO}(C^{EVO}) \cdot \left(\sum_{j \in J} a_j(x_j + s_j) + \sum_{k \in K} c_k y_k \right), \quad (35)$$

kde $p^{EVO}(C^{EVO})$ udává cenu za zpracování v závislosti na kapacitě a výraz $\sum_j a_j(x_j + s_j) + \sum_k c_k y_k$ souvisí se množstvím odpadu (viz obr. 30b).



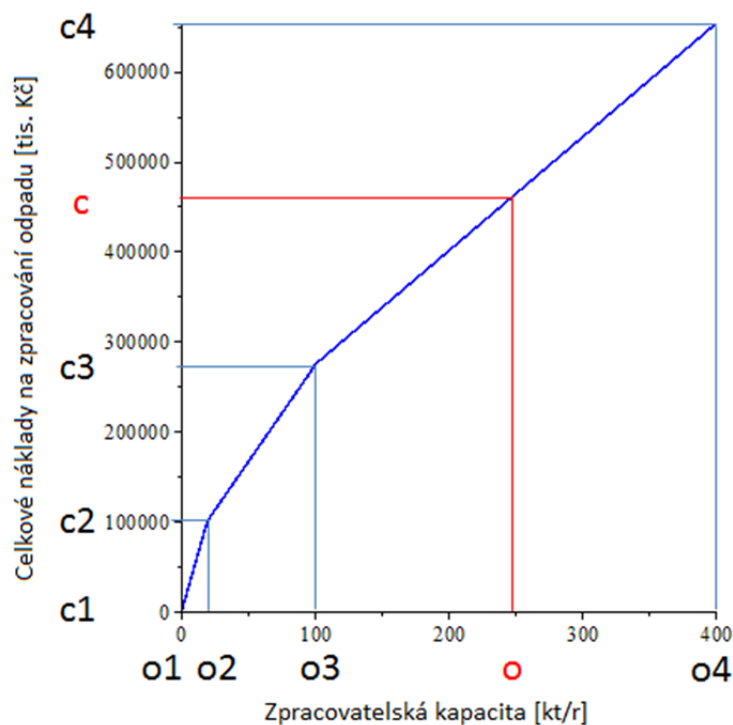
Pozn.: grafy odpovídají situaci, kdy je množství odpadu srovnatelné s kapacitou zařízení (plně využitá kapacita zařízení).

Obr. 30: Cena na bráně v závislosti na kapacitě a celkové náklady za zpracování odpadu v závislosti na množství odpadu

Celkové náklady na zpracování odpadu (viz pravá strana obr. 30) vystupují rovnicí (21) prezentované úlohy. Tato závislost je popsána konkávní ryze rostoucí křivkou, předpis závislosti je tvaru:

$$N = k_1 C^{k_2}, \quad (36)$$

kde značí N náklady (z pohledu producenta) a k_1, k_2 jsou vhodné konstanty. Parametr C představuje zpracovatelskou kapacitu. Jelikož je v úloze hledáno minimální řešení (minimální řešení na konkávní křivce), není možné zajistit nalezení globálního extrému. Z tohoto důvodu byla provedena linearizace úlohy pomocí proložení popisované závislosti po částech lineární křivkou. Ukázka proložení a nástin principu dalšího zpracování je uveden na obr. 31.



Obr. 31: Linearizace úlohy pomocí proložení nelineární funkce po částech lineární křivkou

Na obr. 31 je vidět proložení nelineární závislosti (nákladová funkce) třemi úsečkami danými body $([o_1, c_1], [o_2, c_2])$, $([o_2, c_2], [o_3, c_3])$ a $([o_3, c_3], [o_4, c_4])$. Úloha je zpracována v programu GAMS, kde byla využita proměnná typu SOS 2 (Special ordered set typu 2). Jedná se o seřazenou množinu nenulových proměnných, z nichž maximálně dvě po sobě jdoucí proměnné jsou nenulové. Princip výpočtu ukázkového bodu $[o, c]$ je popsán v následujících rovnicích.

$$c = \sum_{i \in I} \mu_i c_i, \quad (37)$$

$$\sum_i \mu_i = 1, \text{ kde } \mu_i \text{ jsou typu SOS 2.} \quad (38)$$

V ukázkovém příkladu je μ_3 a μ_4 rovno 0,5 (bod [o, c] je přesně v polovině mezi body [o3, c3] a [o4, c4]). Ostatní proměnné typu SOS 2 jsou nulové. Zavedením tohoto popisu se změni zápis rovnice související s maximalizací *IRR* (21). Popis nákladů na zpracování odpadu v konkrétním zařízení EVO se změni z původního tvaru rovnice (35) na nový zápis:

$$\sum_i C\mu_i. \quad (39)$$

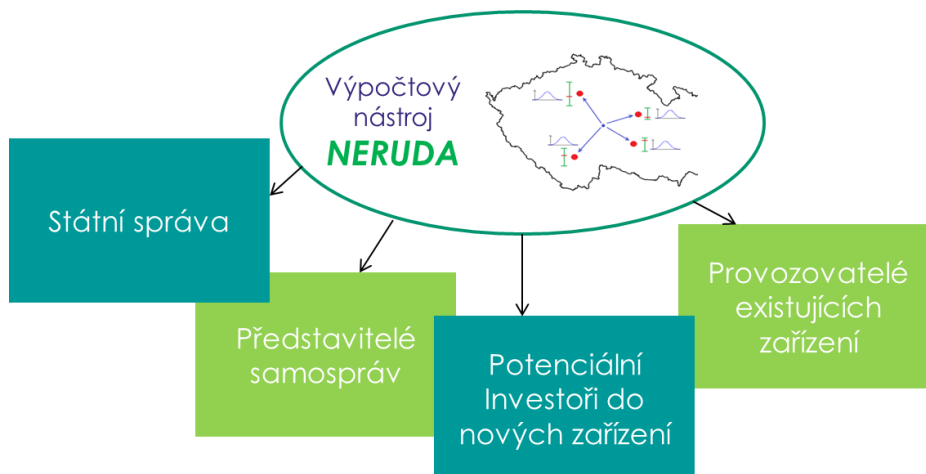
Stejným způsobem se zavede změna pro všechny uvažované technologie (EVO, MBÚ, překládací stanice). Použití SOS 2 sice vede na celočíselné programování, ale při použití algoritmu „Branch and bound“ je garantováno nalezení globálního optima.

4.6 Oblasti použití nástroje *NERUDA*

Výpočtový systém *NERUDA* představuje univerzální nástroj, který je vždy modifikován pro potřeby dané aplikace a s ohledem na konkrétní zadání. Může být aplikován na zcela jiné území a dokonce i jiný typ odpadu, popř. více druhů odpadů. Můžeme identifikovat několik potenciálních subjektů, které mohou mít přínos z aplikace nástroje (viz obr. 32).

- Státní správa, dotčená ministerstva – podpora klíčových rozhodnutí a analýzy související s přípravou strategických dokumentů a zákonů (SEK, POH apod.).¹
- Kraje, regiony, obce – podpora přípravy POH, studie proveditelnosti a analýza rizik investičních záměrů, optimalizace umístění a návrh kapacitního řešení překládacích stanic.
- Provozovatelé a investoři zařízení EVO – optimalizace kapacity zařízení z pohledu uplatnění tepla a dostupnosti odpadu, detailní svozové studie, optimalizace logistického řetězce s využitím silniční i železniční dopravy.

¹ Pozn.: S využitím systému *NERUDA* lze např. simulovat dopad postupného zvyšování poplatku za skládkování na tok odpadu mezi koncovými zařízeními doplněný o hodnocení dopadů na koncové uživatele.



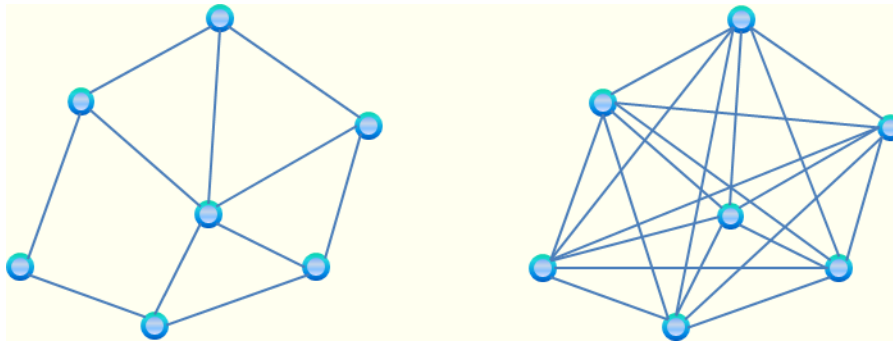
Obr. 32: NERUDA - jeden nástroj, mnoho modifikací a způsobů prezentace výsledků dle potřeb zadavatele

V následující části práce (kap. 7) bude ukázáno více přístupů s použitím výpočtového nástroje NERUDA. Pro řadu problémů je uvedena případová studie s metodikou výpočtu a dílčími výsledky.

5. Výpočtový nástroj PIGEON

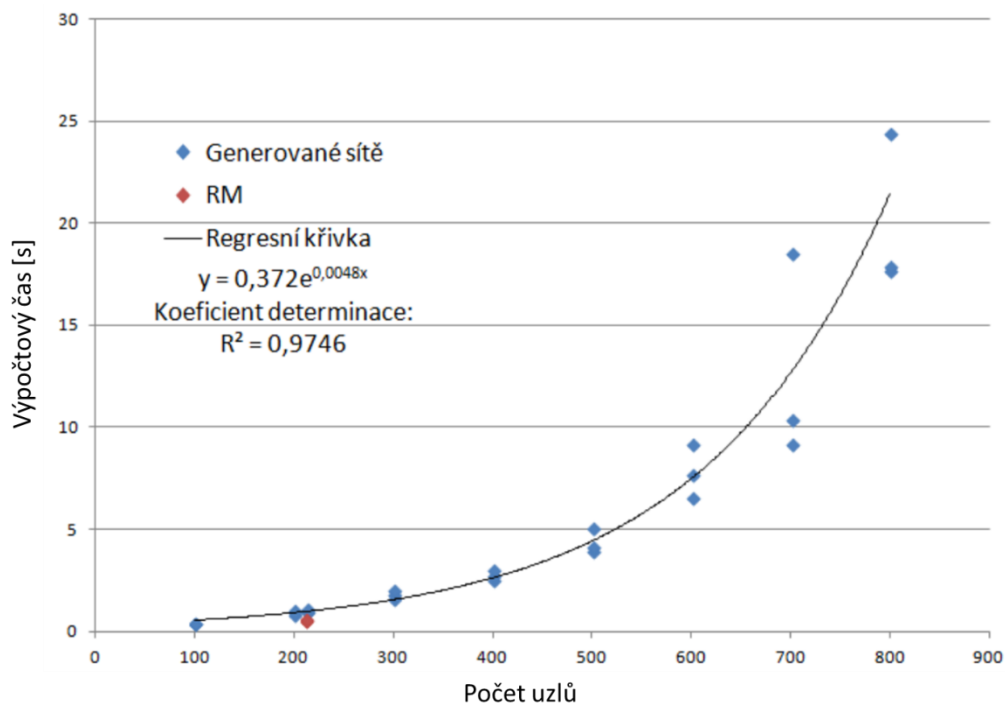
Velmi zajímavé informace navazující na výstupy nástroje NERUDA jsou ekonomické dopady na producenty odpadu v jednotlivých simulacích při měnících se okrajových podmínkách výpočtu. V případě analýzy těchto dopadů je třeba mít informaci, jakým způsobem producent naložil se svým odpadem (kde odpad zpracoval a jakým způsobem odpad přepravil). Při řešení nástrojem NERUDA vznikl problém související s přístupem k tvorbě dopravní sítě. Dopravní síť v základní verzi nástroje NERUDA obsahuje pouze nejkratší hrany zajišťující přepravu mezi sousedními uzly (viz obr. 20), tím není známa informace, kde zpracoval producent svůj odpad. Jednou z možností řešení je zpětné dopočítání, případně vhodné vytvoření dopravní sítě.

Při tvorbě sítě (propojení uzlů hranami) lze využít více přístupů. Graf lze vytvořit pro minimální množství hran, které zaručí minimální vzdálenost mezi uzly pro libovolně zvolenou dvojici, v dalším textu „síťový graf“ (viz obr. 33 – levá část). Jiný přístup spočívá v konstrukci dopravní sítě za pomoci úplného grafu – každý uzel je spojen hranou s každým uzlem (viz obr. 33 – pravá část). V nástroji NERUDA je hledanou neznámou množství odpadu, které teče po jednotlivých hranách. U úplného grafu se to týká všech hran, tzn. logickou výhodou druhého přístupu je dokonalá informace o toku v grafu, nevýhodou je velké množství hran a s tím spojená velká výpočtová náročnost. Další možností je kombinace uvedených variant. Ta může být vhodná v případě potřeby detailnějšího zpracování pouze určité geografické oblasti.



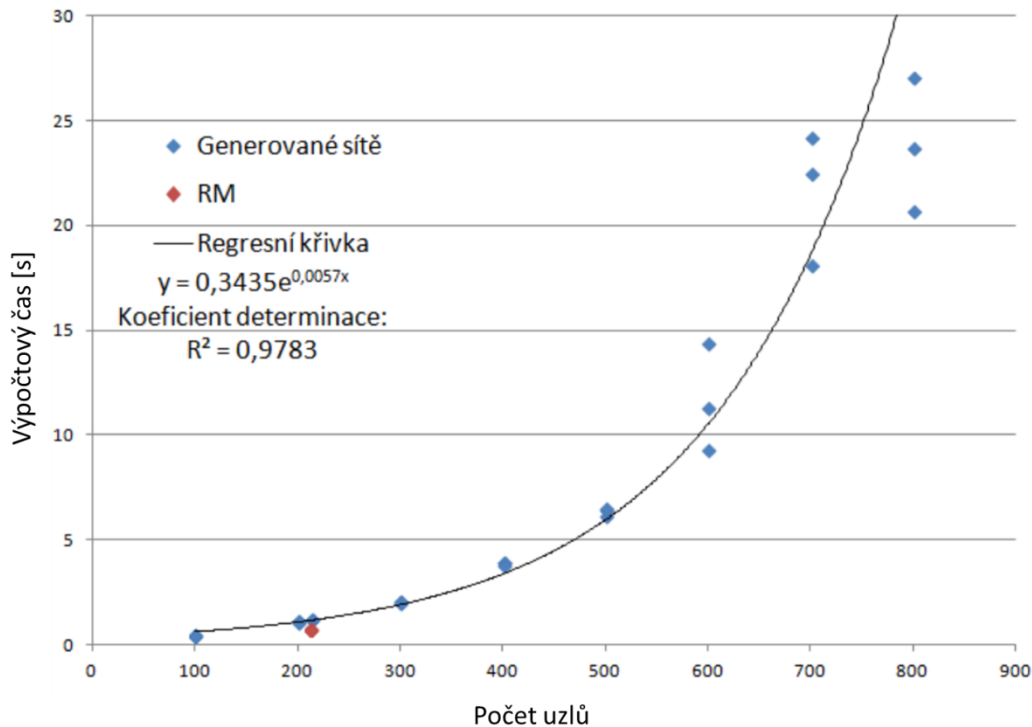
Obr. 33: Ukázka uvažovaných typů sítí

Při použití úplného grafu vzniká problém s časovou řešitelností úlohy pro větší sítě. Proto byla detailně analyzována problematika časové náročnosti výpočtů nástroje *NERUDA* v návaznosti na množství uzlů. Výsledky jsou podrobně popsány v bakalářské práci [51]. V uvedené práci byly testovány dva modely *síťového grafu*, pouze silniční síť (viz obr. 34) a síť zahrnující i železniční přepravu (viz obr. 35). Z důvodu nedostatku vstupních dat pro rozsáhlé sítě, byly testovací sítě vhodně generovány. Z výsledků je patrné, že přidání železniční infrastruktury nemá skokový vliv na výpočtovou náročnost úlohy. Naopak s přibývajícím počtem uzlů (velikost hodnoceného území nebo jiná úroveň detailu) narůstá výpočtový čas exponenciálně. Dále je nutné mít na paměti, že vlivem velkého množství neurčitostí, je třeba řešit úlohu v mnoha scénářových simulacích (řádově tisíce). Proto pro udržení praktické řešitelnosti úlohy je nutné pro větší sítě volit zjednodušení modelu. Detailnější popis, jak bylo přistupováno k testování výpočtového nástroje, je uveden v [51].



Pozn.: RM – reálný model

Obr. 34: Výpočtová náročnost v závislosti na počtu uzlů – model bez železnice [51]

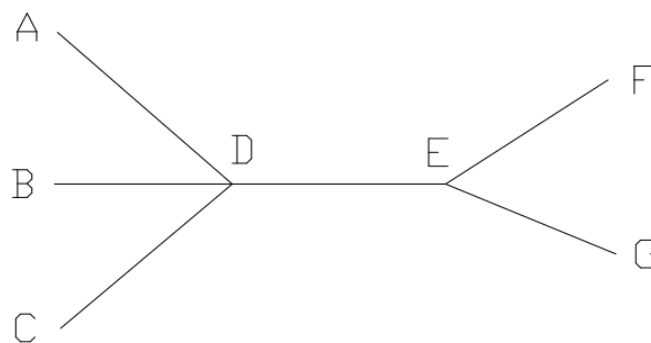


Pozn.: RM – reálný model

Obr. 35: Výpočtová náročnost v závislosti na počtu uzlů – model s železnicí [51]

Na základě podrobné analýzy výsledků a vlastností modelů se síťovým, ale i úplným grafem, bylo zjištěno, že v obou popsáných případech (viz obr. 33) narazíme na problém s víceznačným řešením úlohy. Existuje více řešení, která jsou charakteristická stejnou hodnotou účelové funkce pro hodnocený region. Tato situace nastává v momentě, kdy se odpad od více producentů spojí v určitém uzlu a následně se zase rozdělí v další části dopravní cesty. Po rozdělení už není jednoznačné, v jakém poměru se odpad od konkrétního producenta rozdělil. Existuje tedy nekonečné množství možností, jak odpad rozdělit mezi jednotlivé producenty. Pro lepší vzhled je uveden následující motivační příklad.

Tři producenti (uzly A, B, C) produkují odpad, ten je odvezen do společného uzlu D, a to každý po své hraně (A–D, B–D, C–D). Odtud se odpad veze dohromady do uzlu E po hraně D–E, kde se musí rozdělit do dvou toků (hrany E–F, E–G) mířících ke zpracovatelům (F, G). Tato dopravní síť je znázorněna na obr. 36.



Obr. 36: Dopravní síť motivačního příkladu [52]

U motivačního příkladu z obr. 36 víme pouze, v jakém poměru se tok rozdělí v uzlu E. Nevíme ale, který z producentů veze odpad do konkrétního místa zpracování. Zpracovatelské zařízení nabízí producentům cenu za zpracování. Ta může být výrazně rozdílná s ohledem na konkrétní podmínky v dané lokalitě (např. cena a možné množství uplatnitelného tepla). Proto je klíčové z pohledu producenta znát místo zpracování svého odpadu. Nejde pouze o náklady na zpracování, významnou položkou mohou být i dopravní náklady (např. v případě, že uzel F je podstatně dál od uzlu E oproti vzdálenosti uzlů E a G). Z tohoto důvodu je třeba data (výsledky výpočtů) z nástroje *NERUDA* zpracovat pomocí dalšího nástroje. Druhou možností je modifikace matematického modelu nástroje *NERUDA*, která by měla za následek významné navýšení proměnných a tím i navýšení výpočtového času. Pro větší sítě by tato modifikace mohla vést k obtížné řešitelnosti úlohy.

Proto vznikla myšlenka vytvořit nový matematický model, který bude schopen analyzovat možnosti dopadů víceznačného řešení na náklady za zpracování odpadu pro jednotlivé producenty. Prvotní dílčí úlohou, která se zaměřovala pouze na tok SKO s jedinou možností způsobu zpracování v zařízeních EVO, se zabývala bakalářská práce [52]. Tato úloha byla dále rozpracována pro všechny uvažované přepravní komodity (SKO, možnost slisovaného SKO, LF) včetně všech uvažovaných způsobů zpracování (zařízení EVO, MBÚ, skládky). Nový výpočtový nástroj byl pojmenován *PIGEON*.

Nástroj *PIGEON* se s problémem víceznačného řešení vypořádal pomocí metody vážených součtů (WSM - weighted sum method), viz [53]. Při aplikování této metody se každá část účelová funkce, odpovídající danému producentovi, vynásobí nějakou nezápornou vahou, odpovídající důležitosti tohoto kritéria (čím větší váha, tím je kladem na kritérium větší důraz). Tyto násobky jsou dále sečteny, čímž je získána jediná účelová funkce, která se následně minimalizuje. Hodnota těchto vah je uvažována náhodně a generuje se z rovnoměrného rozdělení pravděpodobností z daného intervalu. Realizace těchto náhodně generovaných vah dávají výsledné scénáře, které jsou po dostatečném počtu výpočtů analyzovány. Tato metoda se také využívá např. při produkci methanolu s ohledem na emisi CO₂ v článku [54]. Další využívanou metodou je Weighted product method (WPM). V metodě WPM se účelová funkce skládá ze součinů dílčích účelových funkcí $f_i(x)$ umocněných danou vahou w_i . Tato metoda má však svá úskalí, a to ve vznikajících

nelinearitách, které při růstu úlohy významně ovlivní výpočtový čas. Mezi další metody patří Constraint scalarization, Ordered Weighted Averaging (OWA) viz [55], [56] nebo Objective-wise worst case, viz [57].

Použitý přístup nástroje *PIGEON* je založen na myšlence, že existuje pořadník producentů (obcí), podle kterého se určuje přednost obce při rozhodování, kam svůj odpad veze. Obce se v úloze rozhodují na základě nejnižší ceny za zpracování jejich odpadu. Zde je základní rozdíl v principu výpočtu nástroje *NERUDA* a *PIGEON*. V nástroji *NERUDA* se minimalizují celkové náklady pro všechny obce najednou. V případě nástroje *PIGEON* je brán ohled na jednotlivé obce podle jejich pořadí výběru. V případě motivačního příkladu je pořadí například 1. A, 2. B, 3. C. Obec A má tedy přednost před obcemi B a C při rozhodování, v jakém poměru rozdělí svůj odpad mezi hrany E–F a E–G. Pokud se obec A jako první v pořadí rozhodne vést svůj odpad ke zpracovateli F (hrana E–F), omezuje tím kapacitu hrany pro obec v pořadí za ní. Počáteční kapacita hrany je dána výsledkem z nástroje *NERUDA* a od této kapacity se odečítá tok odpadu od producenta A – nové omezení kapacity hrany pro obec B.

Tyto principy jsou zpracovány v nástroji *PIGEON*. Pomocí tohoto nástroje je možné simulovat různé pořadí při výběru zpracovatele z pohledu producentů odpadu. V úloze jsou minimalizovány celkové náklady na zpracování odpadu (cena za zpracování plus dopravní náklady) v součtu pro všechny obce. Na rozdíl od nástroje *NERUDA* je tentokrát tok odpadu přiřazen danému producentovi (každý odpad má index podle svého producenta) a do účelové funkce se přidává tzv. váha, která určuje pořadí producenta. Z účelové funkce je význam váhy zřejmý: má-li váha vysokou hodnotu, zvyšuje uměle hodnotu celkových nákladů pro danou obec. V minimalizační úloze to zvyšuje důraz na nižší celkové náklady na zpracování pro danou obec. Váha je ještě před výpočtem znormována, aby se odstranil vliv množství zpracovávaného odpadu. Pokud by se to neudělalo, mohlo by se stát, že např. vážená celková cena za zpracování pro obec s miliónem obyvatel i při nízké váze (vyšší pořadové číslo) bude vždy vyšší, než vážená cena za zpracování pro obec s dvaceti tisíci obyvateli.

Čím později se obec rozhoduje (vyšší pořadí), tím hroší má situaci, protože kapacity výhodných zpracovatelů již mohou být obsazeny obcemi, které měly nižší pořadí (vyšší váhu). Z pohledu praktické aplikace pořadník také simuluje to, v jakém okamžiku začnou obce řešit, kde bude jejich odpad zpracováván. Vzhledem k tomu, že toto nelze dopředu určit, nezbyvá než náhodně generovat pořadí obcí. Nahodilé pořadí se generuje řadově pro dostatečné množství případů (řadově stovky až tisíce). Vzniklá data se dále analyzují z pohledu dopadů na celkové náklady u jednotlivých obcí.

Z důvodu simulování různého pořadí při výběru zpracovatele se mění celkové náklady pro producenta. Jak bude ukázáno později (viz kap. 7) na základě konkrétních výsledků, u některých lokalit to v určitém scénáři vývoje okrajových podmínek v OH příliš nevede, není pro ně v blízkém okolí konkurenční boj o zpracovatele. Naopak v jiných lokalitách může být tento efekt znatelný (výrazné zvýšení nákladů na zpracování odpadu). V případě, že u nějaké obce se náklady v rámci provedených simulací výrazně liší, je obec citlivá na aktivní přístup

k OH (v případě nečinnosti může mít výrazně dražší zpracování odpadu). Pro získání skutečných nákladů pro jednotlivé obce je potřeba náklady přepočítat bez přidělených vah. Detailní matematický model je uveden v následující kapitole.

5.1 Matematický model nástroje *PIGEON*

Optimalizační nástroj *PIGEON* představuje lineární stochastický model popisující rozdělení toků několika typů surovin v dopravní síti mezi zúčastněné prvky (obce). S těmito toky jsou spojené celkové náklady na dopravu, což je pro obce významný parametr. Cílem modelu je zjistit, jaké mohou být finanční náklady pro jednotlivé obce a jak se navzájem ovlivňují. Z těchto poznatků můžeme dále také usuzovat, zda se při nějaké spolupráci mezi obcemi mohou tyto náklady ještě snížit. Všechna omezení tohoto modelu jsou lineární a vychází z bilančních rovnic a daných vstupů. Hlavní částí modelu jsou dílčí účelové funkce pro každou obec. Z tohoto důvodu jde o úlohu vícekritériální optimalizace. Naší snahou je však se s těmito kritérii vypořádat co nejlépe a zjistit co nejvíce informací.

Nejdříve je vhodné uvést všechny prvky systému. Základním prvkem je obec (producent odpadu). Dále model tvoří dopravní infrastruktura, v nástroji je uvažovaná silniční a železniční síť. Posledním článkem jsou zpracovatelé odpadu. V modelu uvažujeme zařízení EVO, MBÚ a skládky. U zařízení MBÚ je nutné dále uvažovat zařízení na zpracování LF. Pro zefektivnění dopravy je uvažována možnost výstavby překládacích stanic. Kapacity zařízení jsou pevně dány z toků odpadu po jednotlivých hranách. Tato informace je výstupem nástroje *NERUDA*.

Nyní je vhodné nadefinovat použité množiny a jejich označení. Množinu uzlů udávají prvky $k \in K$. Množinu obcí udávají prvky $j \in J$ (podmnožina uzlů $K \supseteq J$, jde o uzly, které produkují zbytkový spalitelný odpad, dále v matematickém modelu označen jako SKO). Množina $m \in M$ udává zpracovatelské uzly (podmnožina uzlů $K \supseteq M$; jde o uzly, kde je možné zpracovat SKO) a množina $n \in N$ označuje nekonečné uzly (podmnožina uzlů $K \supseteq N$; jde o uzly, kde nelze zpracovat SKO). Index $i \in I$ označuje silniční hrany a index $l \in L$ udává železniční hrany. Dále jsou popsány vstupní parametry a proměnné řešené úlohy.

Vstupní parametry v úloze:

$a_{k,i}$	incidenční matice pro silniční síť (SKO, LF a slisované SKO - SLIS), [-]
$b_{k,l}$	incidenční matice pro železniční síť (SKO), [-]
o_i	množství SKO na silniční hraně, [t]
f_i	množství LF na silniční hraně, [t]
s_i	množství SLIS na silniční hraně, [t]
t_l	množství SKO na železniční hraně, [t]
w_j	produkce SKO v obci, [t/r]
δ_j	váha pro obec, [-]
p_k^{EVOSKL}	poplatek na bráně u zařízení EVO a skládky, [Kč/t]
p_k^{MBU}	poplatek na bráně u zařízení MBÚ, [Kč/t]
p_k^{PREKL}	poplatek na bráně u překládací stanice, [Kč/t]

c^O	cena za přepravu SKO po silnici, [Kč/km.t]
c^L	cena za přepravu LF po silnici, [Kč/km.t]
c^S	cena za přepravu SLIS po silnici, [Kč/km.t]
c^Z	cena za přepravu SKO po železnici, [Kč/km.t]
d_i^{SIL}	délka silniční hrany, [km]
d_i^{ZEL}	délka železniční hrany, [km]
k^L	transformace SKO na LF, [-]
Q	cena za manipulaci při nakládání a vykládání odpadu u železniční přepravy, [Kč/t].

Seznam proměnných v úloze:

$u_{i,j}^O$	množství SKO od obce na silniční hraně, [t]
$u_{i,j}^L$	množství LF od obce na silniční hraně, [t]
$u_{i,j}^S$	množství SLIS od obce na silniční hraně, [t]
$u_{i,j}^Z$	množství SKO od obce na železniční hraně, [t]
$v_{k,j}^O$	množství SKO po silnici od obce zpracované v uzlu, [t]
$v_{k,j}^L$	množství LF po silnici od obce zpracované v uzlu, [t]
$v_{k,j}^S$	množství SLIS po silnici od obce zpracované v uzlu, [t]
$v_{k,j}^Z$	množství SKO po železnici od obce zpracované v uzlu, [t].

Matematický model popisované síťové úlohy vypadá následovně:

Omezení

První druh omezení zajišťuje požadované množství daného přepravovaného typu odpadu po definovaných hranách konkrétní infrastruktury (SKO, LF, SLIS po silnici a SKO po železnici). Omezení vypadají následovně:

$$\sum_{j \in J} u_{i,j}^O = o_i, \sum_{j \in J} u_{i,j}^L = f_i, \sum_{j \in J} u_{i,j}^S = s_i, \quad \forall i \in I; \sum_{j \in J} u_{i,j}^Z = t_i, \quad \forall l \in L. \quad (40)$$

Další omezení se týká množství zpracovaného odpadu (prostřednictvím zařízení EVO, MBÚ, skládky nebo překládací stanice). Všechn SKO přepravovaný po silnici nebo po železnici se musí zpracovat. Zároveň všechny vzniklý SLIS a LF musí být také zpracován. Omezení vypadá následovně:

$$\sum_{k \in K} v_{k,j}^O = 0, \sum_{k \in K} v_{k,j}^L = 0, \sum_{k \in K} v_{k,j}^S = 0, \sum_{k \in K} v_{k,j}^Z = 0, \quad \forall j \in J. \quad (41)$$

Další omezení zajišťuje zpracování všech vyprodukovaných odpadů. V každé obci se musí naložit na auto (ve slisované nebo neslisované podobě), na železnici nebo zpracovat v zařízení MBÚ. Omezení vypadá následovně:

$$w_j + v_{j,j}^O + k^L v_{j,j}^L + v_{j,j}^S + v_{j,j}^Z = 0, \quad \forall j \in J. \quad (42)$$

Následující omezení zajišťuje: množství SKO, LF a SLIS přepravované po silnici, dodaného z obce do zpracovatelského nebo koncového zařízení, musí odpovídat hranovým proměnným. Stejně platí i pro SKO dopravovaný po železnici. Omezení je tvaru:

$$\sum_{i \in I} (a_{k,i} u_{i,j}^O - v_{k,j}^O) = 0, \sum_{i \in I} (a_{k,j} u_{i,j}^L - v_{k,j}^L) = 0, \quad \forall k \in K, \forall j \in J. \quad (43)$$

$$\sum_{i \in I} (a_{k,j} u_{i,j}^S - v_{k,j}^S) = 0, \sum_{i \in I} (a_{k,l} u_{i,j}^Z - v_{k,j}^Z) = 0, \quad \forall k \in K, \forall j \in J. \quad (44)$$

Klíčovým omezením je bilance jednotlivých uzlů. Odpad, který je v uzlu vyprodukován nebo je do uzlu přivezen, musí být roven odpadu, který je odvezen nebo zpracován (platí pro všechny typy odpadu). Bilanční rovnice je tvaru:

$$\sum_{i \in I} a_{k,i} (o_i + k^L f_i + s_i) + \sum_{l \in L} b_{k,l} t_l - \sum_{j \in J} v_{k,j}^O + k^L v_{k,j}^L + v_{k,j}^S + v_{k,j}^Z = 0, \quad \forall k \in K. \quad (45)$$

Následující bilance udává rovnost mezi SKO převáženým po silnici a jeho následnou transformací na SLIS, LF nebo jeho naložením na železnici. Bilance je tvaru:

$$v_{n,j}^O + k^L v_{n,j}^L + v_{n,j}^S + v_{n,j}^Z = 0, \quad \forall n \in N, \forall j \in J: n \neq j. \quad (46)$$

Následující omezení jsou v modelu z důvodu vynucení znaménkové konvence.

$$v_{j,j}^O \leq 0, \forall j \in J; v_{k,j}^O \geq 0, \forall k \in K, \forall j \in J: k \neq j; \\ v_{n,j}^L, v_{n,j}^S, v_{n,j}^Z \leq 0, \forall n \in N, \forall j \in J; v_{m,j}^L, v_{m,j}^S, v_{m,j}^Z \geq 0, \forall m \in M, \forall j \in J. \quad (47)$$

Další omezení zajišťuje nezápornost hranových proměnných pro silniční a železniční přepravu.

$$u_{i,j}^O \geq 0, u_{i,j}^L \geq 0, u_{i,j}^S \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J; \quad u_{i,j}^Z \geq 0, \quad \forall l \in L, \forall j \in J. \quad (48)$$

Následující omezení zaručuje zpracování veškerého vyprodukováného odpadu v obci prostřednictvím všech uvažovaných zařízení (EVO, MBÚ a skládky). Rovnice je ve tvaru:

$$\sum_m (v_{m,j}^O + k^L v_{m,j}^L + v_{m,j}^S + v_{m,j}^Z) \\ = \sum_m \sum_i a_{m,i} (u_{i,j}^O + k^L u_{i,j}^L + u_{i,j}^S) + \sum_i b_{m,i} u_{i,j}^Z, \forall j \in J. \quad (49)$$

Poslední omezení zajišťuje zpracování veškerého odpadu v konkrétních zařízeních, do kterých byl odpad dovezen od všech producentů. Omezení je tvaru:

$$\sum_j (v_{m,j}^O + k^L v_{m,j}^L + v_{m,j}^S + v_{m,j}^Z) \\ = \sum_j \sum_i a_{m,i} (u_{i,j}^O + k^L u_{i,j}^L + u_{i,j}^S) + \sum_i b_{m,i} u_{i,j}^Z, \forall m \in M. \quad (50)$$

Účelová funkce

Minimalizuj

$$z_j = \sum_j \left[\left[\sum_k - (v_{k,j}^O + v_{k,j}^S + v_{k,j}^Z) p_k^{EVOSKL} - k^L v_{k,j}^L p_k^{MBU} - v_{k,j}^S p_k^{PREKL} \right] \right. \\ \left. - \sum_n v_{n,j}^Z Q + \sum_i d_i^{SIL} (u_{i,j}^O c^O + u_{i,j}^L c^L + u_{i,j}^S c^S) \right. \\ \left. + \sum_l d_i^{ZEL} u_{i,j}^Z c^Z \right]. \quad (51)$$

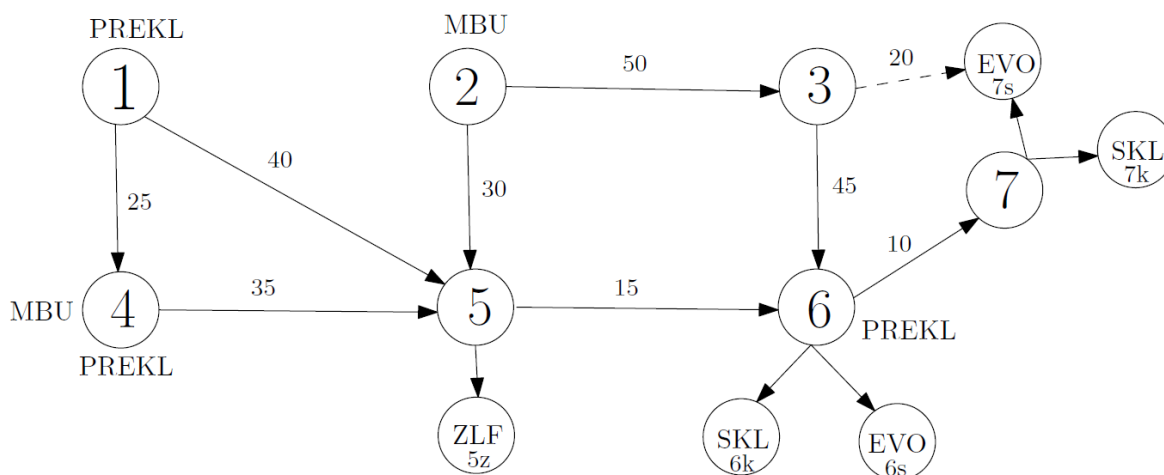
V této chvíli je možné úlohu vhodně doplňovat o dodatečné parametry, které mohou simulovat různé přístupy k řešení úloze. Cílem může být minimální počet zpracovatelů pro jednoho producenta, minimální rozdíl v nákladech mezi producenty nebo lze simulovat dopady aktivního (resp. pasivního) přístupu ze strany zastupitelstva reprezentující ORP (viz text výše). Tento případ je ukázán na následujícím motivačním případě. Do účelové funkce se přidají náhodné váhy δ_i (hodnota je normována produkcí w_j) ke každé OPR. Změněná účelová funkce je tvaru:

Minimalizuj

$$z_j = \sum_j \frac{\delta_j}{w_j} \left[\left[\sum_k - (v_{k,j}^O + v_{k,j}^S + v_{k,j}^Z) p_k^{EVOSKL} - k^L v_{k,j}^L p_k^{MBU} - v_{k,j}^S p_k^{PREKL} \right] \right. \\ \left. - \sum_n v_{n,j}^Z Q + \sum_i d_i^{SIL} (u_{i,j}^O c^O + u_{i,j}^L c^L + u_{i,j}^S c^S) \right. \\ \left. + \sum_l d_i^{ZEL} u_{i,j}^Z c^Z \right]. \quad (52)$$

5.2 Zjednodušený příklad

Pro snadné pochopení problematiky je uveden zjednodušený příklad s malou sítí pouze se sedmi obcemi. V síti se nachází dvě zařízení EVO, dvě skládky (SKL), tři překládací stanice (PREKL), dvě zařízení MBÚ a jedno zařízení na zpracování LF (ZLF). Struktura této sítě je uvedena na obr. 37. Čísla u hran udávají vzdálenost mezi jednotlivými uzly.



Obr. 37: Síť zjednodušeného příkladu

V tab. 5 je uvedeno množství vyprodukovaného odpadu v každé obci a v tab. 6 udává množství odpadu tekoucího po jednotlivých silničních hranách. Po železniční hraně 3–7s (v obr. 37 označena čárkovaně) teče 100 kt SKO. Toky po hranách, v tab. 6, jsou výsledkem výpočtu nástroje *NERUDA* (viz kap. 4).

Tab. 5: Produkce odpadů v jednotlivých obcích zjednodušené úlohy

Obec	1	2	3	4	5	6	7	Celkem
SKO [kt/r]	100	200	100	100	300	200	100	1100

Tab. 6: Množství odpadu tekoucí po silničních hranách

Hrana	1-4	1-5	2-3	2-5	3-6	4-5	5-6	6-7	6-6s	7-7s	6-6k	7-7k	5-5z
SKO [kt]	50		50	100	50		400	150	50	100	50	150	
Slis. SKO [kt]		50				50	100	250	250	250			
LF [kt]				20		40							60

Cenové vstupy úlohy:

poplatek za zpracování v MBÚ: 1500 Kč/t; poplatky za zpracování odpadu v zařízení EVO a SKL: 6s - 1300 Kč/t, 7s - 2250 Kč/t, 6k - 2300 Kč/t, 7k - 2000 Kč/t; poplatek za slisování v překládací stanici v obci: 1 - 18 Kč/t, 4 - 30 Kč/t, 6 - 25 Kč/t; Náklady za přepravu SKO po silnici: 5,2 Kč/t.km; náklady za přepravu LF po silnici: 3,5 Kč/t.km; náklady za přepravu slisovaného SKO po silnici: 3,5 Kč/t.km; náklady za přepravu SKO po železnici na hraně 3–7s - 3,1 Kč/t.km.

Cílem je rozhodnout, která obec bude ve kterém zařízení zpracovávat svůj odpad a jaká budou celkové ceny za zpracování pro jednotlivé ORP v závislosti na generovaných vahách δ_j . Generováním vah se určuje pořadí, v jakém se obce rozhodují o způsobu zpracování (tedy i celkové jednotkové ceně za zpracování) svého odpadu.

Následující ukázka výpočtu je pro pevně zvolené váhy $\delta_j = 1$, pro $\forall j$ (váhy u všech obcí jsou si rovny). Výsledek optimalizační úlohy vypadá následovně (tab. 7 – tab. 13):

Tab. 7: Výsledky pro tok SKO po silnici mezi jednotlivými hranami [kt]

hrana\obec	1	2	3	5	6	7
1-4	50					
2-5		100				
2-3		50				
3-6			50			
5-6		100		300		
6-7					150	
6-6s			49,5	0,5		
7-7s					100	
6-6k				48,9	1,1	
7-7k					50	100

Tab. 8: Výsledky pro tok LF po silnici mezi jednotlivými hranami [kt]

hrana\obec	1	2	4
2-5		20	
4-5	20		20
5-5z	20	20	20

Tab. 9: Výsledky pro tok slisovaného SKO po silnici mezi jednotlivými hranami [kt]

hrana\obec	1	2	3	4	5	6
1-5	50					
4-5				50		
5-6	50			50		
6-7	35,4	32	0,5	48,3	133,8	
6-6s	14,6	68		1,7	116,8	48,9
7-7s	35,4	32	0,5	48,3	133,8	

Poslední informací je tok SKO po železnici mezi jednotlivými hranami, kde po hraně 3–7s teklo 50 kt z uzlu 2 a 50 kt z uzlu 3 (uzly označují původce odpadu). Uvedené výsledky se týkaly jednotlivých hran a typu odpadu. Následující výsledky uvedou bilanci uzlů (tab. 10 až tab. 13).

Tab. 10: Výsledky toku SKO po silnici mezi jednotlivými uzly [kt]

uzel\obec	1	2	3	5	6	7
1	-50					
2		-150				
3		50	-50			
4	50					
5				-300		
6		100	0,5	250,6	-151,1	
7						-100
6s			49,5	0,5		

7s					100	
6k				48,9	1,1	
7k					50	100

Tab. 11: Výsledky toku LF po silnici mezi jednotlivými uzly [kt]

uzel\obec	1	2	4
2		-20	
4	-20		-20
5z	20	20	20

Tab. 12: Výsledky toku slisovaného SKO po silnici mezi jednotlivými uzly [kt]

uzel\obec	1	2	3	4	5	6
1	-50					
4				-50		
6		-100	-0,5		-250,6	-48,9
6s	14,6	68		1,7	116,8	48,9
7s	35,4	32	0,5	48,3	133,8	

Tab. 13: Výsledky toku SKO po železnici mezi jednotlivými uzly [kt]

uzel\obec	2	3
3	-50	-50
7s	50	50

Jednotkové a celkové ceny pro jednotlivé obce jsou zobrazeny v tab. 14.

Tab. 14: Celkové a jednotkové ceny pro uvažované obce v zjednodušené úloze se stejnými vahami pro obce

Obec	Jednotková cena [Kč/t]	Celková cena [Kč]
1	1946	194 605
2	2005	401 040
3	2005	200 520
4	2005	200 520
5	2005	601 560
6	2005	401 040
7	2005	200 520

Z předchozích tabulek s výsledky lze pak snadno zjistit, kde daná obec svůj odpad zpracuje a kudy teče. Jako příklad je uveden výčet pohybu odpadu pro obce 1 a 2.

Obec 1: 50 kt SKO je odvezeno svozovými vozy po hraně 1–4 do uzlu 4, kde se v zařízení MBÚ vyrobí 20 kt LF, která se poté přepraví po hranách 4–5 a 5–5z do ZLF v uzlu 5z. Zbýlých 50 kt SKO se přímo v obci 1 slisuje a poté se odveze po hranách 1–5 a 5–6, kde se

14,6 kt SKO zpracuje v zařízení EVO v uzlu 6s a zbylých 35,4 kt SKO se přepraví po hraně 6–7 a následně zpracuje v zařízení EVO v uzlu 7s.

Obec 2: 150 kt SKO je odvezeno svozovými vozy, z toho 100 kt se přepraví po hranách 2–5 a 5–6 do uzlu 6, kde se slisuje, a z toho 68 kt poté je odvezeno po hraně 6–6s k zpracování v zařízení EVO v uzlu 6s a 32 kt je přepraveno po hranách 6–7 a 7–7s, kde je zpracováno v zařízení EVO v uzlu 7s. Zbylých 50 kt SKO je přepraveno po hraně 2–3 do uzlu 3, kde se naloží na železnici a je odvezeno po hraně 3–7s k zpracování v zařízení EVO v uzlu 7s. Dalších 50 kt SKO se přímo v obci 2 zpracuje v zařízení MBÚ a vyrobí se 20 kt LF, která je poté přepravena po hranách 2–5 a 5–5z ke konečnému zpracování do ZLF v uzlu 5z.

Zvolení stejných vah by mohlo modelovat domluvu obcí, kdy by žádná nebyla zvýhodněna a dohromady by každá měla průměrnou nejmenší cenu za zpracování. V praxi při generování náhodných vah je možné odhadovat interval, velikost rozptylu, průměrnou cenu a stabilitu cen pro každou obec při různých scénářích.

V předchozím příkladu je uvedena situace, kdy všechny váhy δ_j jsou stejné. Systém hledá řešení vhodné pro všechny uzly najednou. To má za následek obdobnou jednotkovou cenu za zpracování (viz tab. 14). Pouze v případě obce 1 je jednotková cena nižší, to je dáno možností snížení jednotkové ceny bez dopadů na ostatní obce. V případě, že nastavíme váhy jinak, bude tento výsledek výrazně jiný i při stejných tocích v síti. Pro ukázkou jsou nastaveny váhy následujícím způsobem: $\delta_1 = 7, \delta_2 = 6, \delta_3 = 5, \delta_4 = 4, \delta_5 = 3, \delta_6 = 2, \delta_7 = 1$. V tomto případě si jako první vybírá způsob zpracování obec 1 bez ohledu na ostatní. Následně obec 2 při změněných podmínkách po výběru obce 1, takto až po poslední obec, která má pouze zbylou jednu variantu bez možností vylepšení svojí jednotkové ceny. Změna nákladů pro jednotlivé obce je uvedena v tab. 15. Po optimalizačním výpočtu se výsledné náklady přepočítaly bez simulovaných vah.

Tab. 15: Celkové a jednotkové ceny pro uvažované obce v zjednodušené úloze s rozdílnými vahami pro obce

Obec	Jednotková cena [Kč/t]	Celková cena [Kč]
1	1576	157 625
2	1839	367 792
3	2018	201 788
4	1550	155 040
5	2098	629 340
6	2314	462 700
7	2255	225 520

V tomto případě jsou ceny významně odlišné. Nižších nákladů dosahují obce, které si dříve vybírají zpracovatele jejich odpadu. To neplatí absolutně, např. obec 7 má nižší jednotkové náklady než obec 6. To je způsobeno konkrétními podmínkami uvedených lokalit. Obec 7 má výhodnější pozici pro daný scénář (rozdělení vah, toky v síti) a proto má lepší podmínky, i když si volí způsob zpracování až po obci 6. V případě jiného rozdělení vah by byl výsledek

zcela rozdílný. Simulací pořadí výběru zpracování pro jednotlivé obce je možné detekovat citlivost u uvažovaných lokalit a tím odhadnout rizikovost dražších cen v budoucnosti v případě pasivního přístupu k OH.

5.3 Časová náročnost výpočetních nástrojů

Celý výpočet v *PIGEON* je proveden pro jeden scénář z nástroje *NERUDA*. Výpočtový čas značně omezuje použití nástroje *PIGEON* na výstupy z nástroje *NERUDA*. S ohledem na to, že pomocí nástroje *NERUDA* jsou počítány tisíce scénářů (nutné z důvodu velkého množství neurčitých parametrů vyskytujících se v úloze), je řešení této analýzy pro každý scénář časově nereálné. Jednak k tomu přispívá velké množství proměnných a hlavně pro jeden scénář z nástroje *NERUDA* jsou počítány desítky až stovky scénářů v nástroji *PIGEON* (pro různou volbu vah pro jednotlivé ORP). Hodnoty výpočtových časů pro jeden scénář *NERUDA* a jeden scénář v *PIGEON* jsou uvedeny v tab. 16. Výpočet byl proveden na Intel(R) Core(TM) i5 CPU 760, RAM 8 GB.

Tab. 16: Časová náročnost popisovaných výpočetních nástrojů

	<i>NERUDA</i>	<i>PIGEON</i>
Průměrný výpočtový čas 1 scénáře [s]	2,1	74

Z důvodu časové náročnosti není možné analyzovat tímto nástrojem všechny scénáře z nástroje *NERUDA*. Proto je potřeba počet scénářů pro další analýzu zredukovat. Otázkou je, které scénáře vybrat. Tímto bodem se zabývá kap. 6.

6. Postprocessing – zpracování výsledků scénářových úloh

Z důvodu značného počtu neurčitostí vystupujících v představených modelech, které jsou často řešeny pomocí scénářového přístupu, je nutná rozsáhlá analýza výstupních dat. Z důvodu zpracovávání výsledků „na míru“, podle stanovených cílů výpočtu, není možné vytvořit obecné algoritmy pro zpracování dat. V prvním kroku je tedy třeba textové výpisy transformovat do vhodného formátu pro následné zpracování v dostupných programech. S ohledem na obecnou dostupnost softwarové podpory jsou data primárně přeformátována do prostředí MS Excel. V tomto softwaru je možné poměrně snadno zpracovat základní charakteristiky analyzovaných proměnných pomocí popisné statistiky, případně vytvořit základní grafové výstupy v podobě histogramů, pravděpodobnostních funkcí, koláčových grafů atd. Tento přístup byl vytvořen v programovacím jazyku *JAVA* v rámci výzkumného projektu WtECC, na kterém se autor textu aktivně podílel. V případě potřeby rozsáhlejší analýzy (např.: vícerozměrného zpracování dat – shluková analýza, metoda hlavních komponent atd., datamining – neuronové sítě, stromové rozdělení dat atd.), je možné využít specializované softwary jako *STATISTICA*, *MATLAB*, *MINITAB* aj.

Důvodem pro vytvoření nástroje *PIGEON* (kap. 5) bylo neposkytnutí dostatečného množství informací o tocích v dopravní síti z modelu *NERUDA*. Dále se pracuje s výstupy vycházející z předešlých výpočtů nástroje *NERUDA*, které jsou vstupem do modelu *PIGEON*. Jelikož do

nástroje *NERUDA* vstupují náhodné parametry, které ovlivní jeho řešení, máme mnoho scénářů, které popisují jednotlivé realizace. Těchto scénářů je ale příliš mnoho na to, aby se každý použil jako vstup, protože je to příliš časově náročné (viz kap. 5.3), a tak je nutné vybrat jen některé, které budou vhodně reprezentovat celkové výsledky.

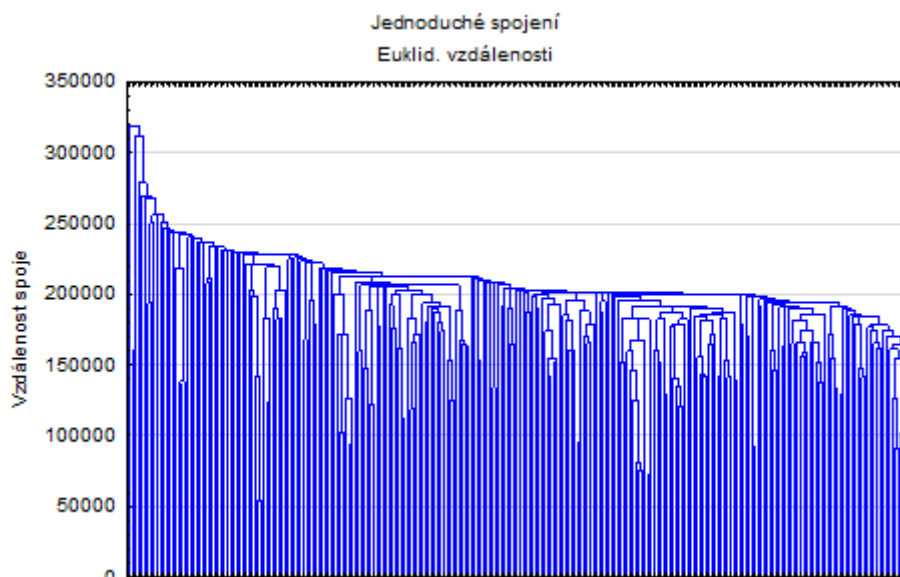
Optimální volba těchto scénářů však není jednoznačná, protože záleží na použitém přístupu. Při redukci scénářů řešeného problému se využila teorie shlukové analýzy (blíže popsána v následující kapitole), která na základě podobnosti jednotlivých řešení vyhodnocuje, která řešení jsou vhodnými reprezentanty. Pro zjištění podobnosti se využívá určité metriky, která zachycuje vzdálenost mezi všemi řešeními výpočtových scénářů. Při řešení popisovaného problému se jako nejvhodnější metrika jevila Eukleidovská. Tato metrika byla využita pro míru podobnosti také v [58]. Jiným přístupem se zabývá článek [59], ve kterém se využívá metoda Fast Forward Selection. Dále pak [60], ve kterém se sestaví vícekriteriální optimalizační úloha, která využívá Kantorovičovu metriku, rozdílů mezi nejlepšími, nejhoršími a průměrnými výstupy k rozhodnutí o reprezentantech.

Z důvodů výpočtové náročnosti propojení nástrojů *NERUDA* a *PIGEON* je v následujícím textu více rozpracována problematika shlukové analýzy v obecné rovině a dále v kap. 7.5 je uveden příklad na reálných datech.

6.1 Shluková analýza

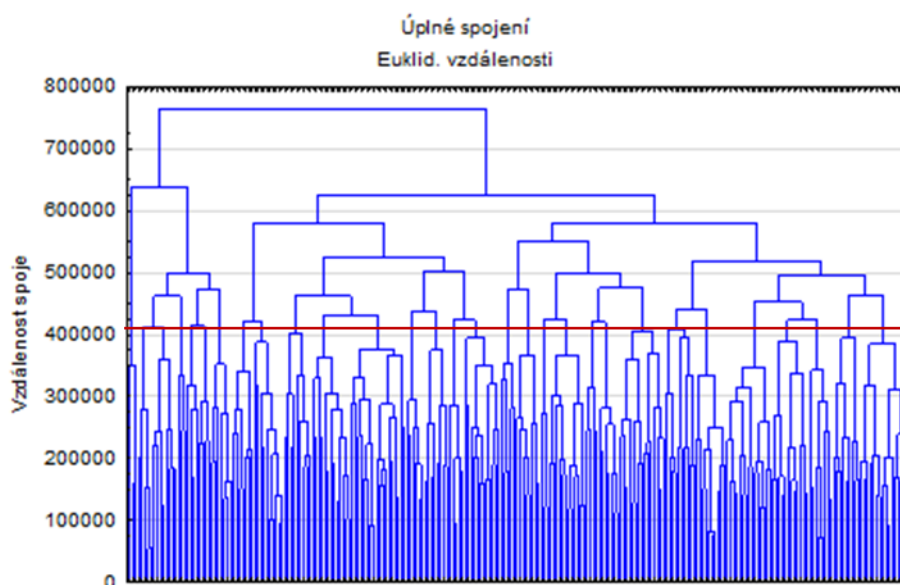
Hlavní motivací pro použití této metody bylo analyzovat podobnost výsledků z výpočtů nástrojem *NERUDA*. Snahou je identifikovat podobné výsledky, ty přiřadit (shluknout) k sobě a následně zpracovávat pouze malý počet reprezentantů z celého shluku podobných výsledků. Uvedený přístup se nazývá shluková analýza a umožňuje i grafické znázornění vzniklé analýzy pomocí malého počtu vhodně zvolených scénářů (této problematice je věnována pozornost v kap. 7.5).

Nejprve je nutné nastavit vhodnou metriku pro vytvoření matice vzdáleností (míra rozdílnosti). A dále přiřazovací pravidlo pro shlukování. Snadný vhled mezi jednotlivými variantami může nabídnout dendrogram, který udává systém shlukování a vzdálenosti mezi jednotlivými shluky. Ukázka pro omezený počet scénářů (z důvodu srozumitelnosti grafu) při použití euklidovské metriky a jednoduchého spojování (spojuje na základě nejbližších prvků v shlucích) je na obr. 38. Pro sestavení dendrogramu byl využit software *STATISTICA*.



Obr. 38: Dendrogram pro jednoduché spojení

Z obr. 38 je patrné spojování bez jasné struktury. Je to dáno metodikou jednoduchého spojování, které spojuje i velmi vzdálené prvky prostřednictvím jednoho blízkého prvku k okolním shlukům. Z tohoto důvodu se jeví v tomto případě výrazně vhodnější spojit shluky na základě nejvzdálenějších prvků (úplné spojení), případně centrálních prvků. Ukázka výsledků pro stejná data metodou úplného spojení je na obr. 39.



Pozn.: červená čára naznačuje možný výběr počtu shluků pro následné zpracování, konkrétní ukázka je v studii v kap. 7.5.

Obr. 39: Dendrogram pro úplné spojení

Graf na obr. 39 vykazuje systematické rysy v průběhu spojování shluků. Pro problematiku hledání podobných výstupů z úlohy řešené nástrojem *NERUDA* se tato metoda jeví jako vhodná. Ostatní metodiky (wardova metoda, (ne)vážený centroid skupin dvojic, (ne)vážený průměr skupin dvojic atd.) dávají obdobné vizuální výsledky. Výraznější změna výsledků

není ani při použití jiné metriky (např. blokové vzdálenosti (Manhattan), procentuální neshoda, euklidovské vzdálenosti na druhou atd.). Kvalitu jednotlivých přístupů je třeba otestovat na chybě, která vznikne použitím omezeného počtu scénářů (pouze reprezentanti jednotlivých shluků). Analýza této problematiky je svým charakterem velmi náročná a přesahuje cíle této práce. Tímto bodem se bude zabývat pracoviště autora v další fázi vývoje popisovaných výpočtových nástrojů. V této práci je ukázán přístup založený na metodě k -průměrů. Konkrétní výsledky jsou zpracovány v kap. 7.5.

6.2 Metoda k -průměrů

V následujícím textu je ukázána aplikace pomocí konkrétního přístupu k shlukování. Jak již bylo zmíněno, při Monte-Carlo simulaci se většinou uvažuje s vysokým počtem scénářů (v některých případech i desetitisíce). To je dáno velkými množstvím neurčitostí, které v úloze vystupují. Výsledky jednotlivých simulací však mají často velmi podobný charakter. Dobré projekty (disponující dostatkem odpadu při ceně na bráně odpovídající požadované návratnosti investice) nástroj doporučuje převážně stavět, pouze pro určité negativní realizace neurčitých parametrů není doporučena výstavba. Proto je možné uvažovat o určité podobnosti mezi jednotlivými scénáři výpočtů. Hlavní myšlenka spočívá ve výběru scénářů, které popíší většinu variability výstupů z nástroje *NERUDA*. K tomu lze použít metody pro zpracování vícerozměrných dat. Vhodnou metodou se v našem případě jeví shluková analýza. Pro naše účely byla použita metoda shlukování založená na myšlence „ k -průměrů“. Jedná se o nejběžnější nehierarchickou metodu. Hlavním cílem metody je nalezení takových skupin (shluků) v mnohorozměrném prostoru, kde vnitroskupinová podobnost je co největší. Princip vytvoření shluků je stejný jako při Wardově metodě: minimalizace celkové sumy čtverců vzdáleností uvnitř skupin. Výsledkem je vytvoření k shluků, které jsou od sebe co nejvíce odděleny. Algoritmus metody je následující:

1. Zvolí se počáteční rozklad do k shluků, nejčastěji náhodně. Podkladem může být také např. výsledek již provedeného shlukování, který chceme zlepšit.
2. Určí se centroidy pro všechny shluky v aktuálním rozkladu.
3. Postupně se zhodnotí pozice všech objektů. Pokud má objekt nejbližší k vlastnímu centroidu, nemění se jeho přiřazení ke shluku, jinak se přiřadí ke shluku, k jehož centroidu má nejbližší.
4. Centroidy každého z k shluků jsou přepočítány.
5. Body 3 a 4 se opakují do té doby, kdy už nenastane žádný přesun mezi jednotlivými shluky.

Tímto způsobem se v k shlucích objekty přesouvají tak, aby se minimalizovala variabilita uvnitř shluku a maximalizovala variabilita mezi shluky (jde o relokační proceduru). Shlukovací proces je iterativní.

Nevýhodou metody k -průměrů je, že pracuje se čtverci Euklidovských vzdáleností. To může být v některých případech problém, zejména při výskytu odlehlých objektů. Metoda k -průměrů je tedy citlivá na odlehlé hodnoty. Další nevýhodou metody je nutnost definovat počet shluků k předem. Je potřebné si uvědomit, že takto je možné získat pouze lokální

extrém, o kterém nemáme jistotu, že je zároveň extrémem globálním. V našem případě je počet shluků omezen časovými limity výpočtu nástroje *PIGEON*.

Pro další vývoj je nutné analyzovat vhodný způsob volby počtu reprezentantů jednotlivých shluků. Stejně tak i přínos v podobě většího počtu scénářů uvažovaných pro výpočet v nástroji *PIGEON*. Shlukovat lze cíleně na základě dalšího použití výstupů. Je možné se dívat z pohledu agregovaných kapacit v rámci energetického zpracování odpadu. Jiný pohled bude při analýze konkrétní lokality, kraje nebo dopadů na dopravní infrastrukturu při výstavbě nových projektů.

7. Aplikace komplexu výpočtových nástrojů pro koncepční návrh zařízení EVO

V mnoha studiích byla řešena témata zabývající se nalezením konkrétních řešení pro udržitelné OH. Tyto studie se běžně zabývají podmínkami v konkrétních oblastech, a jejich závěry jsou proto místně závislé. Metody hodnocení pro různé technologie v OH založené na analýze nákladů a posouzení vlivu na životní prostředí jsou uvedeny v [61]. V Článku [62] byla aplikována metoda LCA na srovnání tří systémů v OH. Text [63] srovnával sedm modelových systémů metodou LCA. Několik publikovaných studií představilo řadu teoretických modelů a postupů, jejichž cílem je najít optimální řešení integrující více technologií. Rozsáhlý přehled modelovacích optimalizačních technik byl publikován v [64]. Optimalizace nakládání s odpady jsou často vypočteny pro velké regiony s cílem navrhnout nejlepší lokalitu pro zařízení v rámci systému OH v dané oblasti. V těchto pracích je zpravidla řešena pouze doprava odpadu a jediným kritériem je cena. Příklady vícekritériální účelové funkce jsou uvedeny v [65] a [66]. Z praktického hlediska jsou v současné době dostupné modely zabývající se těmito otázkami často zjednodušené, nedostatečně propojené, a velmi omezené pro praktické realizace. Výsledky hodnocení OH a jeho srovnání se téměř nikdy neodrážejí v národních a regionálních postupech, které by měly být navrženy tak, aby splňovaly normy a vytyčené cíle. Jinými slovy studie nepodporují každodenní rozhodování. Vědci nyní stojí před úkolem, aby tyto výpočetní metody více sofistikovali a případně vhodně zjednodušili z důvodu řešitelnosti.

Jednou z klíčových technologií v rámci řešení problematiky OH ve vyspělých zemích je zařízení EVO. Realizace nového projektu EVO je poměrně nákladná, složitá a vyžaduje dlouhodobé úsilí. Investiční náklady na zařízení EVO jsou v rozmezí od 18 – 22 tis. Kč/t roční kapacity (viz kap. 3.2 nebo [27]). Přípravná fáze trvá v nejlepším případě pět let, obvykle je ale delší [67]. Kromě toho je životnost těchto zařízení 20 až 30 roků. S cílem pomoci budoucím investorům bylo vydáno několik příruček a návodů, např. [68] a [69]. Navzdory tomu, že příručky byly navrženy pro různé země po různých obdobích, základní principy a podmínky zůstávají stejné, a jsou následující:

- stabilní prostředí pro plánovaný provoz (15-20 roků), relativně stabilní a nejlépe předvídatelné náklady náhradních dílů a spotřebního materiálu, atd.,
- smlouvy pro dodávky energií,
- relativně stabilní trh a náklady na energie,
- spolehlivá dodávka vhodných odpadů pro spalování,
- roční průměr výhřevnosti odpadů by neměl klesnout pod 7 MJ/kg,

- podpora zúčastněných stran,
- akceptovatelnost zařízení od veřejnosti a obcí - dobré povědomí veřejnosti,
- podpora ze strany vlády - zdanění resp. zákaz skládkování, bonusy výroby energií, daňové úlevy, atd.

Pokud jsou všechny tyto podmínky a zásady splněny, situace pro budování projektu EVO je ideální. Pokud se některé z těchto potřeb nedosáhne, projektový tým se musí spoléhat na podrobnou analýzu, která bude prokazovat ekonomickou a technickou proveditelnost projektu z pohledu investora. Projekt musí být přijatelný z pohledu všech zúčastněných stran.

Úvodní studie a studie proveditelnosti jsou hlavní součástí fáze příprav projektu. Po úvodní studii se musí investoři rozhodnout, zda chtějí pokračovat v investičním projektu a je třeba nastavit další akční plán, případně projekt ukončit (nebo pozastavit). Obsahy obou těchto studií jsou v podstatě identické, ale liší se v detailu vstupních dat a jejich struktuře. Úvodní studie je navržena s pomocí obecně dostupných zdrojů. V [69] autor předpokládá strukturu výstupů, které by měly obsahovat jednotlivé studie v rámci projektu výstavby nového zařízení EVO, viz tab. 17.

Tab. 17: Hlavní výstupy z úvodní studie a studie proveditelnosti

Úvodní studie	Studie proveditelnosti
<ul style="list-style-type: none"> • potenciální poloha zařízení, • obrys sběrných oblastí, a základní informace o průměrném složení odpadů pocházejících od různých producentů, • základní demografické údaje, • základní informace o velikosti zařízení – kapacita a technologie, • základní dopad na životní prostředí, • odhad investičních a provozních nákladů a výnosů, • časový harmonogram projektu. 	<ul style="list-style-type: none"> • potenciální poloha zařízení, • identifikace oblasti sběru odpadu, a podrobné informace o jeho složení, • demografické údaje o daném místě, • analýza zainteresovaných stran, • podrobný průzkum trhu s energiemi: spotřeba, cena, konkurence, • návrh zařízení (kapacita, technologie, atd.), • celkové posuzování dopadů na životní prostředí, • organizace projektu – ostatní, • identifikace organizace a řízení zařízení, • analýza rizik a jejich řízení.

Analýza rizik je jednou z nejdůležitějších částí studie proveditelnosti. Analýza rizik je prováděna s cílem identifikovat nejvýznamnější faktory rizika, určit jejich dopady na stabilitu a financování projektu. Dalším výstupem je návrh opatření k zajištění minimalizace těchto rizikových faktorů. Rozsáhlá analýza rizik pro zařízení EVO, zřízené a provozované jako projekt PPP (Public Private Partnership), je uveden ve studii [70], která upozornila na různá související rizika a zařadila je do deseti hlavních skupin. Jedná se o: vládní rozhodovací riziko, úvěrové riziko vlády, právní a politické riziko, technické riziko, změna smlouvy o riziku, rizika pro životní prostředí, ohrožení veřejné opozice, riziko dostupnosti odpadů, platební riziko a riziko výnosů. Studie [70] dále popisuje potenciální korelace rizik, kdy nevhodný rozhodovací proces o výběru umístění zařízení může způsobit nesplnění

ekologických požadavků, nespokojenost místních orgánů, a odstoupení některých smluvních stran od smlouvy.

Základní struktura nákladů a výnosů uvedená na obr. 12 dává jasnou představu, na co by se měla analýza rizik zaměřit. Jednotlivé parametry ovlivňující výdaje a výnosy projektu se významně mění po celou dobu životnosti zařízení. Každý parametr má jiný vliv na konečnou návratnost investice. Výdaje obvykle moc nekolísají a je malé riziko, že zařízení potká vážná porucha nebo musí čelit nečekaným výdajům. Riziko je tedy spojeno převážně s výnosy zařízení. Výnosy zahrnují příjmy z prodeje elektřiny a tepla (dodávky do soustavy CZT, nebo integrace zařízení EVO s jinými komerčními prostory), které jsou ovlivněny cenovými trendy a celkovým vyrobeným množstvím. Dostupnost odpadu je nejvýznamnější příjmovou položkou, která je úzce spjata s udržitelností projektu.

Studie [70] pojednává pouze o existenci rizik. Bohužel práce neposkytuje žádné kvantifikované údaje týkající se rizik a jejich dopadů, pokud jde ekonomické ukazatele, např. *IRR* nebo *PB*, popsané v [71]. Články [72] a [73] udávají kvantitativní údaje vztahující se k riziku. Používají přístup založený na metodě Monte Carlo. Analýza je uplatněna na fotovoltaiku a větrné elektrárny. Výsledkem jsou různé ukazatele pomáhající posoudit kvalitu investice do projektu, viz [71]. Výsledek článku [72] je kritérium *NPV* a dynamická doba návratnosti (*TD*). Ve článku [73] je analyzováno kritérium založené na *IRR*. V obou případech jde o výrobu energie z obnovitelných zdrojů (vítr, slunce). Dostupnost větru a slunce je poměrně náhodná, a tím narušuje konkurenceschopnost projektů. Proto je vhodné použít v hodnocení statistické plánování a analyzovat různé scénáře pro vývoj neurčitých parametrů. Podobná analýza pro zařízení EVO byla nastíněna v [74], kde byl vymodelován poplatek na bráně při různých vstupních parametrech.

Vysoké investiční náklady, nejistota zisku (dostupnost odpadu, náklady na energie, atd.) spolu s konkurencí v podobě skládek pro zařízení EVO vytvářejí ideální podmínky pro použití pokročilých simulačních a hodnotících technik. Tyto nástroje poskytují investorovi a zúčastněným stranám potřebné informace pro jejich rozhodování. Všechny studie zabývající se projektováním a stavbou zařízení EVO (např. [68], [69], [70]), uvádějí seznam jednotlivých rizik, ale neuvádějí žádnou metodiku pro výpočet vstupních dat pro jejich analýzu. Tato práce představuje metodiku a nezbytné výpočetní nástroje pro komplexní zhodnocení investic do projektu pomocí scénářů budoucích realizací neurčitých parametrů.

Vzhledem k univerzálnosti nástrojů představených v kap. 3 až 5 existuje mnoho variací nastavení úlohy, které se liší svou složitostí, výpočtovou náročností, požadavky na vstupní data a zejména tím, co má být spočítáno (množina neznámých hodnot). Typický postup výpočtu lze popsat následovně. Pro uvažované lokality EVO je zadána fixní zpracovatelská kapacita nebo její maximální výše (může být dána splněním faktoru *R1*). Externími modely (T-E modely) se dopočítají ceny na bráně, které zajistí požadovanou návratnost v podobě *IRR*. Základní úloha uvedená výše (kap. 4) je současně řešena pro všechny uzly (všechny ORP) s cílem nalézt místa zpracování odpadu pro každý uzel tak, aby celkové náklady pro všechny obce byly minimální. Současně je tím navržena optimální kapacita a umístění zařízení EVO. Pokud je to ekonomicky výhodné, jsou navržena místa pro vznik zařízení MBÚ, jejich kapacita a místa zpracování LF. Pokud je to výhodné, je navržena v určitém místě překládací

stanice. Současně je získána informace o toku odpadu na celém území. Mezi dílčí úlohy může patřit:

- vyhodnocení rizikovosti projektu, schopnost naplnit určitou zpracovatelskou kapacitu,
- optimalizace umístění překládacích stanic,
- vyhodnocení toku odpadu v rámci území, výpočet celkových resp. průměrných nákladů na zpracování a dopravu,
- plánování způsobu dopravy (silniční, železniční),
- vyhodnocení dopadu legislativních změn na způsob nakládání se zbytkovými spalitelnými odpady (dopad výše skládkovacího poplatku na tok odpadu v rámci ČR, scénář modelující zákaz skládkování),
- posouzení možnosti přeshraničního transportu odpadu do zahraničí za účelem jeho energetického využití.

Dále v textu této kapitoly jsou prezentovány výsledky různých ukázkových výpočtů. Cílem není přímá diskuse výsledků, ale ukázka možností a přínosů prezentovaných nástrojů. Proto je většina grafů prezentována bez uvedení konkrétního jména posuzovaného území a v některých případech i konkrétních čísel u cenových funkcí.

V následujícím textu budou ukázány možnosti prezentovaných optimalizačních systémů na konkrétních příkladech. V kap. 7.1 – 7.3 budou uvedeny výpočty pro potenciálního investora. Kap. 7.4 bude věnována analýze z pohledu statní koncepce a v kap. 7.5 je detailně analyzována problematika nakládání se SKO z pohledu producentů (ORP).

7.1 Vyhodnocení lokalit pro výstavbu zařízení EVO – z pohledu investora

Použití výpočtového nástroje pro aplikaci zaměřenou na plánování výstavby nových zařízení EVO v předem vybraných zájmových lokalitách bude ukázána na případové studii, kde je převážná část vstupů čerpána ze studie vypracované pro MPO z roku 2011 [20].

7.1.1 Úvod k případové studii

Problematika výstavby zařízení EVO je v ČR stále aktuálním tématem. Podrobně se jí věnují např. článek [75], a zmíněná studie [20]. Hlavní výstup této studie je uveden v úvodu této práce (kap. 1.2). Koncept navrhuje až 11 nových projektů EVO s celkovou kapacitou 2200 kt/r po roce 2020. Volba kapacit jednotlivých projektů byla zvolena na základě prognózy produkce odpadů vhodných pro energetické využití. Koncept neřešil udržitelnost jednotlivých projektů z pohledu dostupnosti odpadu za podmínek zajišťujících požadovanou ekonomiku uvažovaných zařízení.

Díky nástroji *NERUDA* je možné jít s analýzami ze studie z roku 2011 (viz [20]) ještě o krok dále. V následujícím textu bude ukázka simulace pro konkrétní lokality uvažované pro výstavbu nových zařízení EVO nejen z technického hlediska, ale i s ohledem na ekonomickou udržitelnost jednotlivých projektů.

Výpočty vycházejí ze závěrů studie [20], kde je uvažováno s výstavbou nových zařízení EVO v lokalitách s velkým množstvím uplatnitelného tepla do sítě CZT (viz obr. 7). Tato dodávka je v současné době zajištěna především prostřednictvím uhelných tepláren. Nové lokality pro zařízení EVO budou tedy spojeny s velkými městy, kde existuje dostatečně rozsáhlý systém CZT.

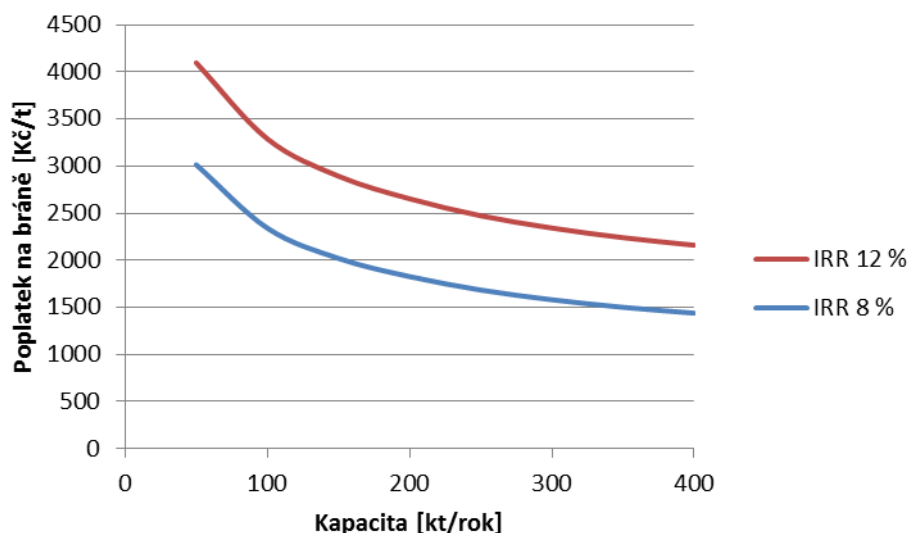
7.1.2 Výpočty a simulace Monte Carlo

V úloze se vyskytuje velké množství neurčitých parametrů, které mají zásadní vliv na ekonomiku projektu. V případě, že jejich budoucí realizace bude negativní z pohledu požadovaných výnosů, je možné vhodně upravit poplatek na bráně zařízení a tím udržet požadovanou návratnost investice. Otázkou je, zda bude za stanovený poplatek na bráně dostatek odpadu pro uvažované zařízení. Touto otázkou se zabývají výpočty v této kapitole.

Vzhledem k tomu, že poplatek na bráně je rozhodující vstupní parametr v modelu, bude začátek této části věnován připomínkám k metodice jeho odhadu. V celé řadě publikovaných textů se uvažuje s konstantní cenou na bráně zařízení. V této případové studii se bere v úvahu snížení měrných investičních nákladů s vyšší kapacitou. Funkce popisující závislost ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě (viz obr. 13) je navržena zvlášť pro každý uvažovaný projekt s pomocí externích T-E modelů. To umožňuje brát v úvahu konkrétní podmínky v jednotlivých lokalitách (např. poptávka po teple, cena tepla, stávající infrastruktura, požadavek na návratnost investice).

Udržitelnost a finanční atraktivnost každého nového projektu je dána mnoha nejistými parametry (ceny energií, kvalita odpadu - výhřevnost, údržba, legislativní podmínky, atd.). Všechny tyto parametry mají své vlastní pozitivní nebo negativní vlivy na cash-flow projektu a následně na jeho ziskovost, která se často vyjadřuje kritériem *IRR*. Citlivost *IRR* může být testována za předpokladu pevné ceny na bráně s využitím komplexního T-E modelu. A naopak, pokud je *IRR* pevně nastaveno, můžeme analyzovat citlivost poplatku na bráně. Pro každý uvažovaný projekt, v naší případové studii, bylo uvažováno se stejnou mírou ziskovosti – základní požadované *IRR* bylo stanoveno na 10 %, v souladu s dílčím doporučením z kap. 2. Pro postihnutí nejistoty byla také nastavena jeho minimální a maximální hodnota, 8 a 12 %. Odpovídající intervaly poplatků na bráně byly stanoveny v dalším kroku vzhledem k mezím pro *IRR* (příklad je uveden na obr. 40).

Optimalizační výpočet, kde ekonomický ukazatel *IRR* je dán rovnicí (20), se opakuje tisíckrát při různé kombinaci cen na bráně u jednotlivých zařízení EVO. Ceny na bráně pro každý výpočet byly generovány metodou Monte Carlo z normálního rozdělení pravděpodobností (interval ceny na bráně představoval $\pm 3\sigma$). Tento stochastický přístup, který může být považován za „wait and see“, podle terminologie stochastického programování [26], umožňuje následnou statistickou analýzu výsledků.



Obr. 40: Příklad funkce ceny na bráně závisle na kapacitě vytvořené pro jeden konkrétní projekt.

Výsledky (text níže) dokazují složitost úlohy, která má řešit všechny konkurenční projekty současně. V prezentovaných výsledcích je ukázána citlivostní analýza pro dva scénáře legislativního zatížení pro zařízení EVO a MBÚ (SC1 a SC2). Stejným způsobem lze zpracovat i další faktory ovlivňující výsledky (výhřevnost, dopravní náklady a omezení, situace v sousedních zemích – přeshraniční přeprava odpadů a další). U každého faktoru jsou k dispozici dva možné přístupy. Je možné faktory modelovat scénářově nebo pomocí generování hodnot z intervalů (rozdělení pravděpodobností). První metoda byla použita pro SC1 a SC2, druhá pro modelování poplatku na bráně odpovídající *IRR* z intervalu 8 až 12 % (viz obr. 40). Pro každou z dalších aplikací lze model upravit s ohledem na požadované cíle výpočtu.

7.1.3 Vyhodnocení výsledků

Představený způsob výpočtů umožňuje rozsáhle statistické zpracování výsledků v návaznosti na cíle úlohy. V následné části textu budou ukázány některé z možných přístupů pro zpracování výsledků řešené úlohy.

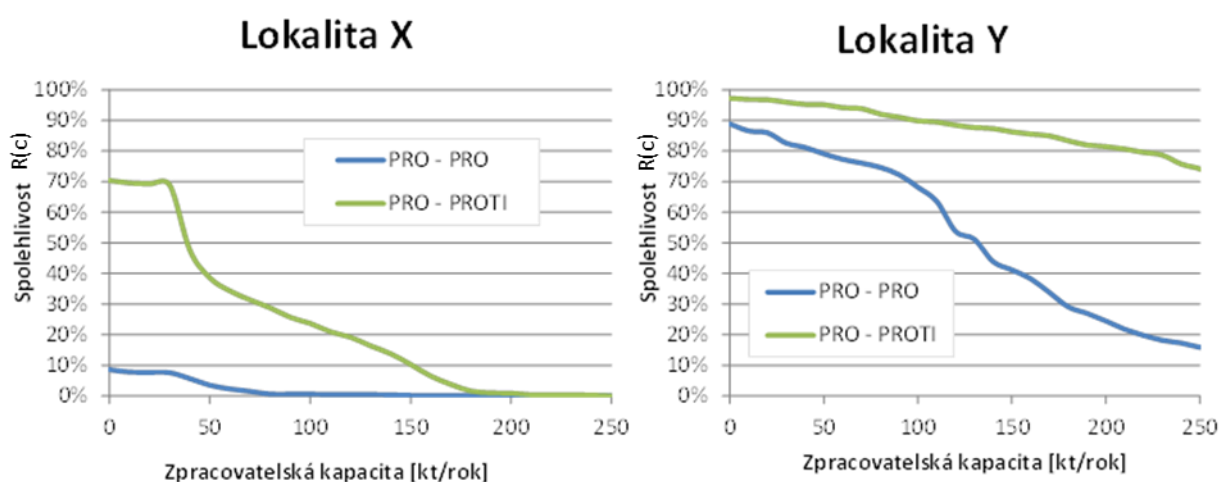
První způsob se vztahuje k analýze atraktivity, kde se porovnávají dva projekty EVO umístěné v různých lokalitách (označené jako X a Y). Pro oba projekty je z výsledků spočítána spolehlivost v závislosti na zpracovatelské kapacitě. Tuto spolehlivost lze vyjádřit pomocí tzv. funkce přežití (viz obr. 41, z angl. Survival function). Tu je možné zapsat vztahem:

$$R(c) = P(\{C > c\}) = \int_c^{\infty} f(u) du = 1 - F(c), \quad (53)$$

kde $F(c)$ je kumulativní distribuční funkce a c je kapacita zařízení. Funkce $F(c)$ je získána z výsledků simulace Monte Carlo. V každém výpočtovém běhu byla navržena optimální kapacita c projektu, která odráží aktuální sazby cen na bráně u všech konkurenčních projektů. Funkce přežití $R(c)$ (komplementární kumulativní distribuční funkce neboli funkce spolehlivosti) pak vyjadřuje procento pokusů, které doporučily vyšší návoz odpadu, než je kapacita c . Kromě toho byly zahrnuty dva různé scénáře týkající se legislativního vývoje

(scénář SC1 - podpora pouze pro zařízení EVO (PRO - PROTI), scénář SC2 – podpora pro zařízení EVO a MBÚ (PRO - PRO)). V tab. 18 jsou porovnány stejné kapacity 150 kt/r u obou hodnocených projektů. Výsledky ukazují projekt Y jako méně citlivý na budoucí vývoj konkurenčních projektů, zatímco projekt X je velmi rizikový a pravděpodobně ho bude možné provozovat pouze za určitých okolností, což vede k nižší ceně na bráně a následně nižšímu *IRR*. Graficky je výsledek zobrazen v obr. 41.

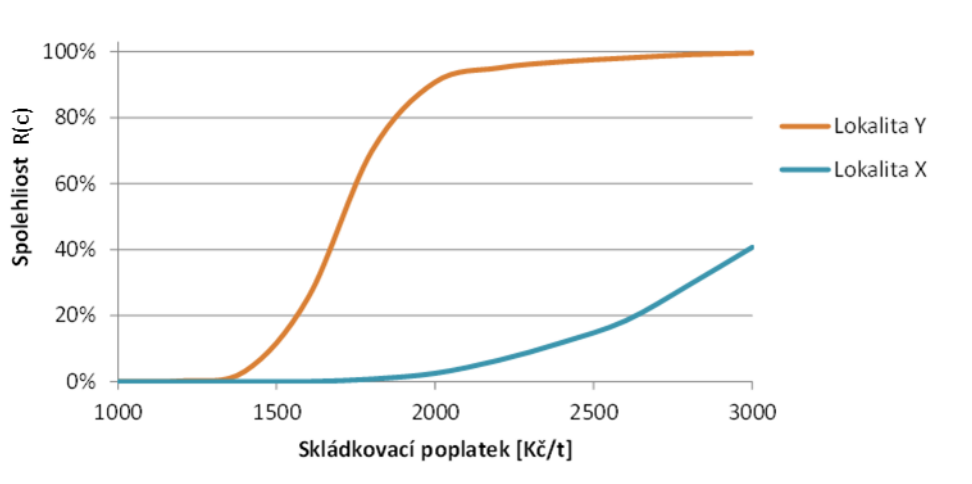
Dále je možné spekulovat o vlivu ještě vyšší daně za skládkování. V našem výpočtu bylo uvažováno s rozsahem 1000 – 3000 Kč/t. Tato situace je znázorněna na obr. 42, kde je znázorněn vztah mezi spolehlivostí a skládkovacím poplatkem. Projekt v lokalitě X vykazuje velmi malou spolehlivost i v podmínkách vysokého skládkovacího poplatku. V případě plánované výstavby by bylo třeba analyzovat, za jakých podmínek je možné zlepšit jeho konkurenceschopnost (např. v případě municipálního projektu s nižším požadavkem na návratnost investice).



a) Rizikový projekt

b) Atraktivní projekt

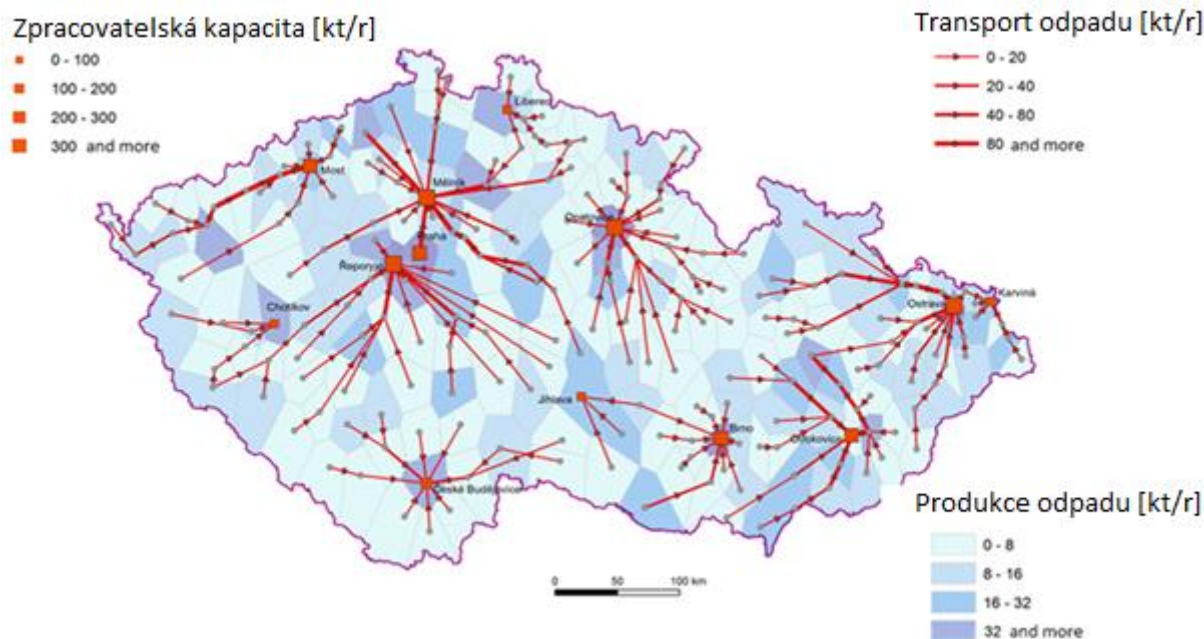
Obr. 41: Analýza spolehlivosti naplnění kapacity u dvou projektů v různých lokalitách a pro dva různé scénáře budoucího vývoje legislativy



Obr. 42: Analýza spolehlivosti naplnění kapacity u dvou projektů v rámci různých sazeb skládkovacího poplatku

Výsledky funkce přežití $R(c)$ pro plánované kapacity všech projektů ze studie [20] pro jeden scénář vývoje legislativy jsou uvedeny v tab. 18. Výpočet také navrhuje svazové oblasti pro

každé zařízení, díky tomu je možné mapovat očekávaný budoucí tok odpadu v regionech. Tato informace má zásadní význam pro průzkum dopravního zatížení a plánování infrastruktury. Grafické znázornění sběrných oblastí je znázorněno na obr. 43. Rozložení na obr. 43 (vybraný scénář) plně odpovídá navrhovanému konceptu OH (viz studie [20]), všechna zařízení EVO jsou v provozu. Většina odpadů je spalována přímo, jen malá část prochází procesem MBÚ nebo je ukládána na skládky. Tyto proudy jsou z důvodu přehlednosti z obr. 43 vyloučeny.



Obr. 43: Vizualizace výsledků modelu pro jeden konkrétní scénář dopravy - vysoký skládkovací poplatek, energie vyrobená v zařízení EVO je podporována dotacemi

Tab. 18: Hodnoty spolehlivosti pro projekty s kapacitou uvažovanou v konceptu studie [20] (scénář SC2)

	X	Y	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Plánovaná kapacita [kt/r], [20]	150	150	171	220	285	96	190	180	270	95	452	220	140	163
Funkce přežití $R(c)$, [%]	2	43	35	100	88	97	17	98	79	31	86	97	13	85

7.2 Analýza rizik pro konkrétní zařízení EVO v jeho koncepční fázi vývoje – z pohledu investora

Tato část textu se bude věnovat přehledu souvisejících rizik spojených s výstavbou a následným provozem zařízení EVO. Jedním z hlavních rizik je množství a konstantní dodávka spalitelného odpadu, tj. dostupnost odpadu. Tomuto riziku bude věnována první část v této kapitole.

7.2.1 Simulační analýza pro hodnocení faktoru dostupnosti odpadu

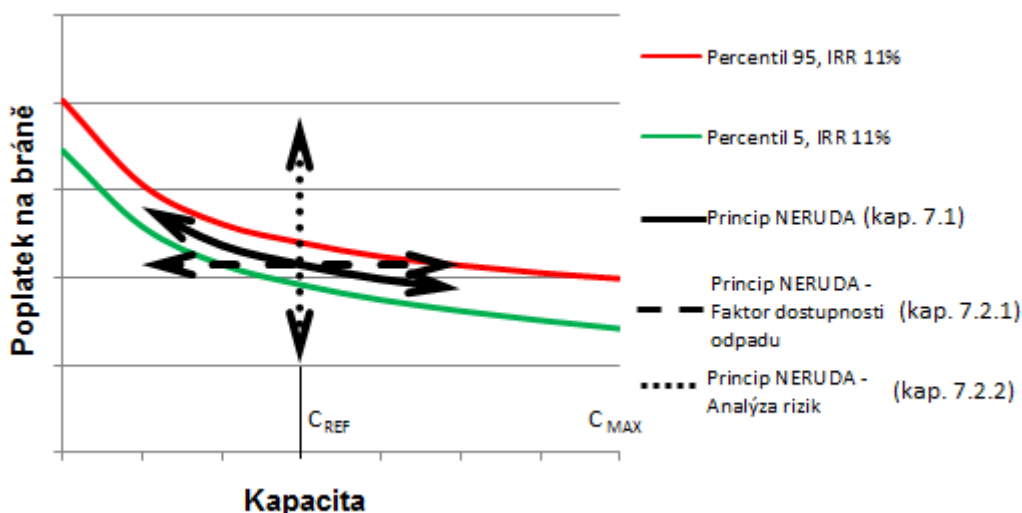
Problematika dostupnosti odpadu je zmíněna v každém příspěvku zabývající se analýzou rizik při hodnocení projektu EVO. Nicméně, žádná z prací neobsahuje deterministický přístup jak dostupnost odpadu hodnotit. To je samozřejmě předpokladem pro kvantitativní posouzení

rizik a jakékoli identifikace vlivu tohoto rizika na finanční stránku projektu EVO (např. s využitím ukazatele *IRR*). Cílem tohoto textu je formulovat nové kritérium s názvem *faktor dostupnosti odpadu* a začlenit ho do popsané metodiky pro hodnocení projektů EVO. Toto nové kritérium umožňuje kvantifikovat dostupnost odpadu při různých změnách okrajových podmínek výpočtů (jedná se např. o parametry: kapacita, skládkovací poplatek, *IRR*). Než bude představen samotný výpočet faktoru dostupnosti odpadu, budou definovány parametry, které jsou pro hodnocení potřebné:

- C_{REF} - referenční kapacita. Kapacita zařízení, která je předmětem analýzy rizik dostupnosti odpadu, musí být stanovena před výpočtem.
- C_{MAX} - maximální kapacita projektu. Měla by být větší než C_{REF} , čímž dává možnost dovézt do zařízení více odpadu.
- C_{OPT} - optimální kapacita - výsledek získaný v každém kroku výpočtů (simulací). Jedná se o součet odpadů přivezených do zařízení EVO, $C_{OPT} = m_{wa}$.
- m_{wa} - množství odpadu přivezeného do zařízení EVO na základě výpočtů v nástroji *NERUDA*.
- faktor dostupnosti odpadu (*WAF*) - poměr mezi dostupností odpadu m_{wa} a plánovanou referenční kapacitou C_{REF} , definovanou v rovnici (54).

$$WAF = \frac{m_{WA}}{C_{REF}}. \quad (54)$$

Simulační analýza vytvořená prostřednictvím nástroje *NERUDA* poskytuje kvantifikaci dostupnosti odpadu prostřednictvím kritéria *WAF*. V článku [76] je popsán základní princip výpočtů v nástroji *NERUDA*. Zkrácený popis je následující: kapacita stávajících projektů je dána. Optimální kapacita C_{OPT} všech nových projektů je dopočítána prostřednictvím nabídnuté ceny na bráně související s kapacitou. Tento princip je uveden na obr. 44. Kapacita jednotlivých projektů může být omezena C_{MAX} .



Obr. 44: Princip nástroje *NERUDA*

Aby bylo možné hodnotit riziko v podobě dostupnosti odpadu, je základní princip výpočtu mírně upraven. Analýza je prováděna pro pevně dané kapacitní řešení (C_{REF}). Modifikovaný

princip je následující: pokud nemají původci levnější alternativu pro zpracování jejich odpadu, je odpad k dispozici pro řešené zařízení.

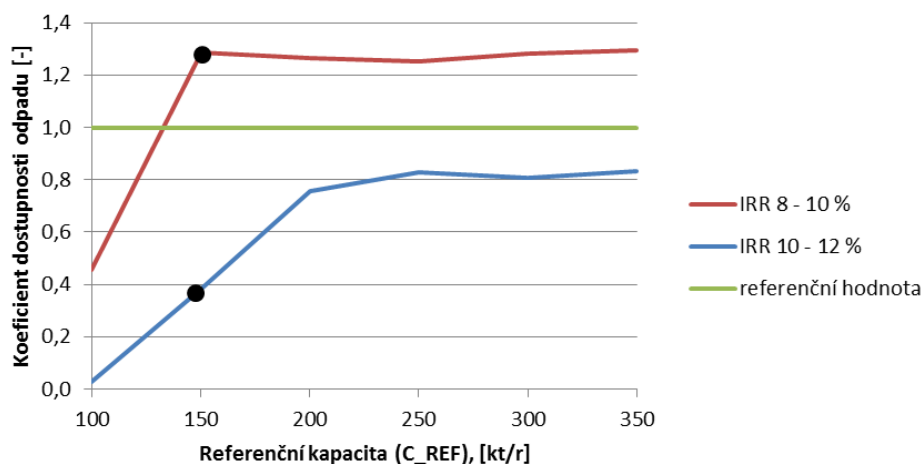
Výpočty se obvykle provádí jako stochastická simulace, v tuto chvíli ale nebudou uvažovány žádné scénáře. Postup simulačního běhu se skládá z následujících kroků:

- Kapacita hodnoceného projektu je pevně stanovena $C = C_{REF}$. Cena na bráně (GF_{REF}) je přiřazena na základě funkční závislosti na kapacitě C a bude fixní po celou dobu výpočtů.
- V jiných lokalitách (konkurenční projekty) je cena na bráně závislá na kapacitě ($GF = f(c)$) a bude dopočtena v rámci výpočtu. Kapacita C_{OPT} je totiž neznámá (proměnná) a poplatek na bráně je dán závislostí (viz obr. 44). Náklady na zpracování odpadu pro všechny konkurenční projekty jsou stanoveny pomocí T-E modelu.
- Pro tuto chvíli je kapacita řešeného projektu neznámá, hranice C_{MAX} je uvolněná (kapacita je teoreticky neomezená) a hledáme optimální množství odpadu m_{wa} , které je k dispozici za nabídnutou cenu (GF_{REF}). Princip výpočtu je zobrazen na obr. 44.
- Faktor dostupnosti odpadu je vyhodnocen pomocí rovnice (53).

V případě, že dostupnost odpadu m_{wa} je vyšší než referenční kapacita C_{REF} , projekt je udržitelný a splňuje požadavky na ziskovost, WAF je vyšší než 1. V případě, že množství dostupného odpadu je nižší než referenční kapacita zařízení, není za referenční cenu GF_{REF} dostatek odpadu k dispozici (WAF je menší než 1, viz obr. 45). Pro získání dostatečného množství odpadu musí investor snížit cenu na bráně, a tím i očekávaný výnos (IRR). Aby bylo možné prokázat závislost dostupnosti odpadu na výnosnosti projektu, byly vypočítány WAF pro různé požadavky na IRR . Toto řešení nám umožňuje simulovat uspořádání plánovaných projektů z pohledu rizika dostupnosti odpadu.

Základní princip uvedený v předchozím textu bude nyní rozšířen o neurčitosti. Ty budou generovány pomocí scénářů. V této fázi vývoje projektu není pevně daná kapacita zařízení EVO. Proto bude analyzován vliv kapacity (C_{REF}) na WAF . Simulace proběhla pro 6 scénářů v kapacitním rozmezí C_{REF} 100 – 350 kt/r (krok po 50 kt/r). Další nejistota se nachází ve vývoji právních předpisů s ohledem na skládkovací poplatek. Předpokládalo se rozmezí 1000 – 2200 Kč/t (sedm scénářů s krokem po 200 Kč/t). Celkem byla provedena simulace pro 42 scénářů (všechny kombinace pro vývoj skládkovacího poplatku a volbu kapacity). Pro každý scénář bylo provedeno 500 výpočtů (simulací), u kterých se pro všechny projekty náhodně generovaly ceny na bráně z předem zvoleného intervalu.

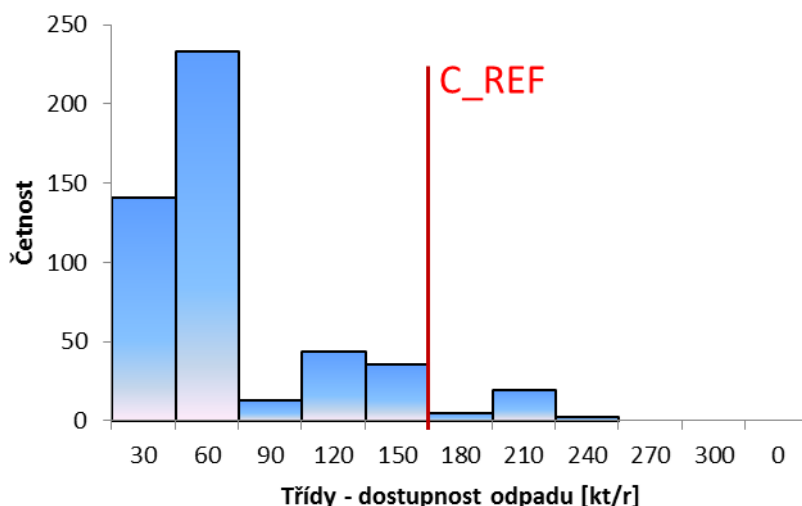
Obr. 45 zobrazuje citlivost WAF na měnící se kapacitě C_{REF} . Výsledky jsou platné pro skládkovací poplatek 2000 Kč/t. Výsledky jsou uvedeny dále pro dvě možnosti požadovaných výnosů: IRR v rozmezí 10 až 12 % a 8 až 10 %.



Obr. 45: Závislost WAF na referenční kapacitě C_{REF}

Projekt s nižšími požadavky na IRR (8 – 10 %) přináší lepší výsledky pro všechny kapacitní varianty v porovnání s vyššími požadavky na výnos (IRR 10 – 12 %). Pro obě varianty požadavku IRR WAF stoupá spolu s rostoucí kapacitou, viz obr. 45. Projekt s požadavkem na IRR 8 – 10 % má dostatek odpadu, je-li kapacita větší než 150 kt/r. Nicméně další zvýšení kapacity nemá za následek zvýšení WAF. Výhodu nižšího poplatku na bráně převažuje větší svozová oblast a s tím spojené vyšší dopravní náklady. Navíc s větší svozovou oblastí je i vyšší konkurenční prostředí z pohledu dostupnosti odpadu. Ve srovnání s referenční kapacitou C_{REF} má projekt rezervu asi 25 až 30 % u kapacit vyšších než 150 kt/r. Pokud investor požaduje vyšší výnos (IRR 10 až 12%), dostupné množství odpadu je nedostačující pro všechny kapacitní scénáře. U kapacit nad 200 kt/r je naplněno asi 80 % z referenční kapacity C_{REF} .

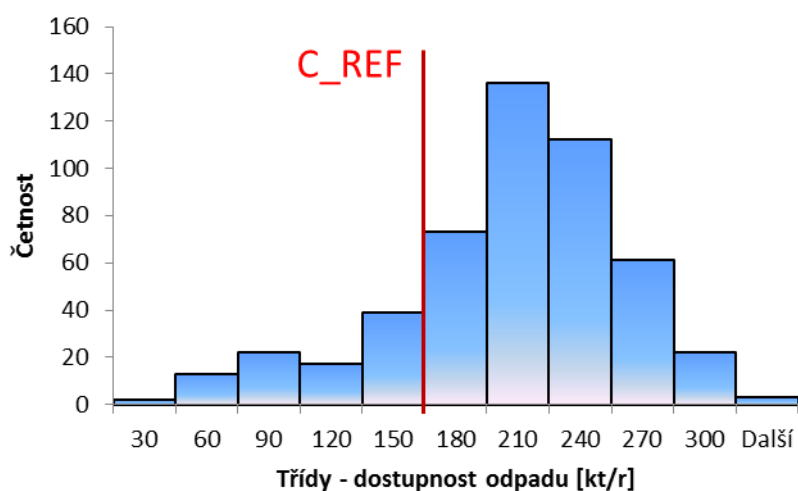
Vzhledem k tomu, že jsou výpočty založené na stochastickém přístupu, byly dosažené výsledky analyzovány podrobněji. Analýza byla zaměřena na kapacitu $C_{REF} = 150$ kt/r (viz černé body na obr. 45). Obr. 46 zobrazuje histogram množství dostupného odpadu (m_{wa}), které bylo vypočteno v rámci simulačních běhů. Výsledky dostupnosti odpadu pro $IRR = 10 - 12$ % jasně ukazují, že většina simulací (95 %) odhadla nedostatečné množství odpadu vzhledem k $C_{REF} = 150$ kt/r. Ve výsledcích pouze 5 % simulací bylo množství dostupného odpadu vyšší než referenční kapacita. Uvedené hodnoty odpovídají průměru s WAF 0,4 (viz obr. 45).



Obr. 46: Histogram dostupnosti odpadu pro IRR 10 – 12 %

Podobný histogram byl sestaven i pro nižší požadavek na výnos – $IRR = 8 - 10 \%$ (viz obr. 47). Ve většině simulací (81 %) bylo k dispozici dostatek odpadu. Zbytek simulací (19 %) ukázal nedostatek odpadu vzhledem k referenční kapacitě.

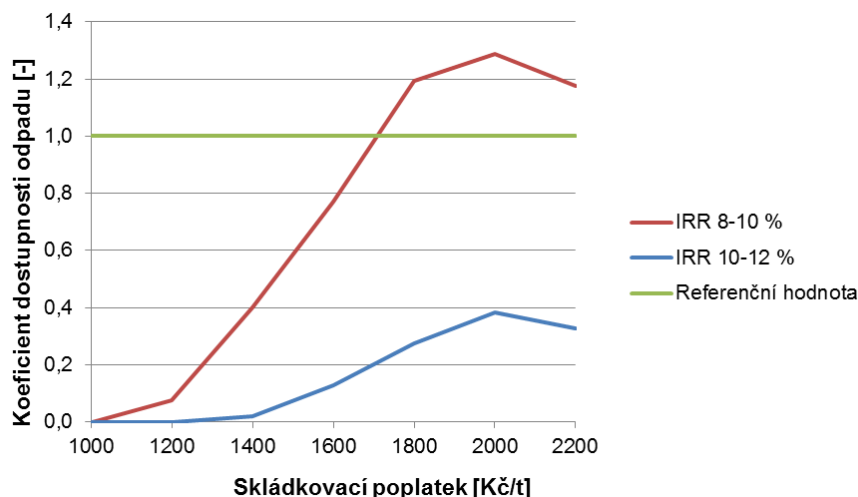
Nyní je možné analyzovat rizikové faktory (okrajové podmínky výpočtu), které zásadně ovlivňují dostupnost odpadu (viz dále).



Obr. 47: Histogram dostupnosti odpadu pro IRR 8 – 10 %

Výsledky ukázaly, že zařízení EVO mělo nedostatečné množství odpadu (WAF nižší než 1) pro požadované $IRR = 10 - 12 \%$. Avšak v případě relativně malého snížení poplatku na bráně (nižší požadavek na výnos – $IRR = 8 - 10 \%$) se podstatně zvýšila pravděpodobnost naplnění kapacity (tj. dostatečné množství odpadu). Závislost WAF na zpracovatelském poplatku je unikátní pro každý projekt, odráží konkrétní umístění a s tím spojenou konkurenční soutěž v blízkosti zařízení.

Posouzení dopadu určitého parametru na dostupnost odpadu je jiný typ analýzy výsledků simulací. Obr. 48 zobrazuje závislost WAF na výši skládkovacího poplatku. Zobrazené výpočty se opět týkají referenční kapacity $C_{REF} = 150$ kt/r. Opět byly analyzovány dvě možnosti potenciálních výnosů: IRR 10 až 12 % a IRR 8 až 10 %. Snížení WAF pro skládkovací poplatek nad 2000 Kč/t je způsobeno výraznější konkurencí ostatních projektů, zejména těch, které vychází z technologie založené na MBÚ. Výsledky uvedené na obr. 48 udávají průměrné hodnoty ze všech simulací s příslušnými okrajovými podmínkami (scénáři).



Obr. 48: Závislost WAF na skládkovacím poplatku

Pro požadavek na výnos vyšší než 10 % je dostupnost odpadu velmi nízká (max. $WAF = 0,4$) i pro vysoké skládkovací poplatky nad 2000 Kč/t. V případě nižšího požadavku na výnos pod 10 % je dostupnost odpadu vyhovující pro skládkovací poplatky nad 1800 Kč/t. V případě, že skládkovací poplatek je kolem 2000 Kč/t, má projekt rezervu ve výši 30 % nad referenční kapacitu C_{REF} . Výsledky je opět možné analyzovat podrobněji (jako u obr. 46 a obr. 47). Dále je možné identifikovat faktory, které představují největší riziko pro dostupnost odpadu a tím i celkovou ekonomickou udržitelnost. Tato problematika bude řešena v následující části.

Předchozí text popisuje vztah mezi poplatkem na bráně a dostupností odpadu. Existuje mnoho rizik, která jsou spojena s poplatkem na bráně. Pro dosažení požadované ekonomiky projektu musí být zvýšené provozní náklady kompenzovány zvýšenými příjmy. Proto je vhodné analyzovat parametry (rizikové faktory), které nejvíce ovlivňují výslednou cenu na bráně a tím konkurenceschopnost projektu.

7.2.2 Komplexní analýza rizika

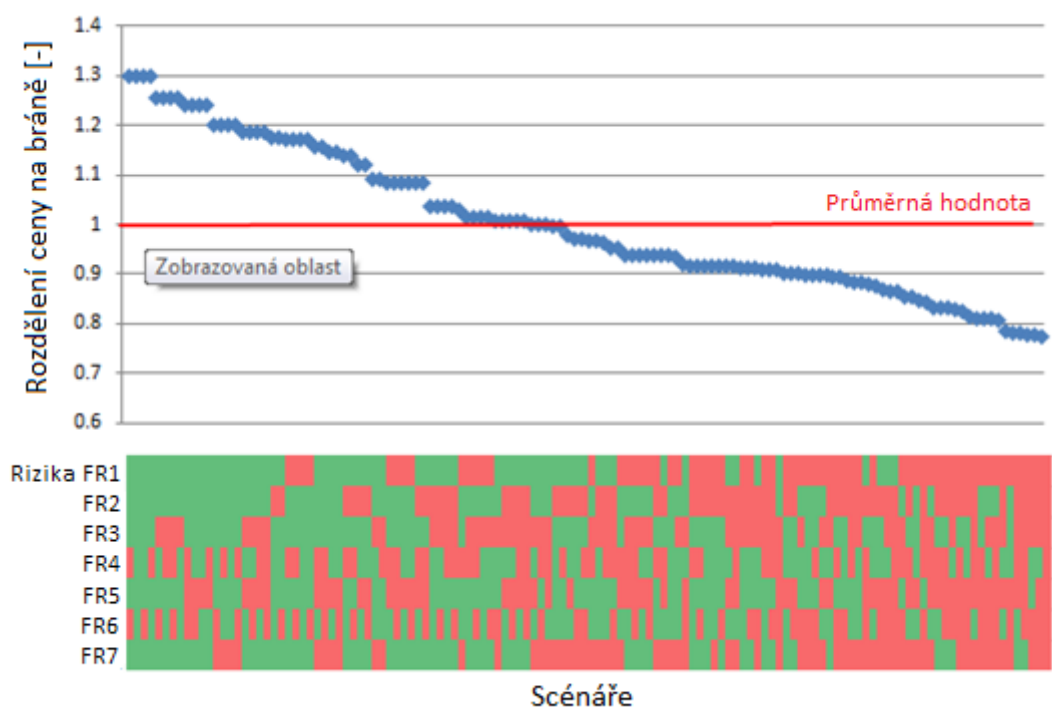
Dostupnost odpadu není jediným rizikovým faktorem ovlivňující úspěšnost projektu. Poslední část komplexní metodiky, uvedené v této části textu, hodnotí další rizikové faktory projektu a snaží se identifikovat jejich dopad na konečnou cenu na bráně zařízení EVO.

Optimalizační nástroj *NERUDA* opakovaně počítá stejnou úlohu pro různé okrajové podmínky, a tak je možné hodnotit dopad vstupních parametrů na výsledky úlohy. Cílem je určit parametry, které představují riziko z pohledu ekonomické udržitelnosti sledovaného

zařízení. Za tímto účelem proběhla diskuze s jedním z potencionálních investorů a výsledkem je seznam předpokládaných rizikových faktorů:

FR1 – ostatní projekty budou očekávat nižší návratnost investic (municipální projekty), FR2 – nízké ceny za zpracování odpadu v zahraničí (Německo, Rakousko), FR3 - produkce zbytkového spalitelných odpadů (především SKO) se výrazně sníží v důsledku zvýšení materiálového využití, FR4 – legislativní prostředí ve prospěch MBÚ (zbytkové a kalorické frakce mohou být zpracovány za méně přísných podmínek), FR5 - snížení cen za skládkování v důsledku nižších zisků, FR6 - většina odpadu bude muset být přepravována vlaky, FR7 - ceny tepla v ostatních lokalitách se zvýší. Všechny tyto faktory mají negativní dopad na dostupnost odpadu a vyvíjejí tlak na cenu na bráně sledovaného zařízení.

Cílem analýzy je kvantifikovat každé z potenciálních rizik. Uvažované parametry jsou označeny jako faktory rizika (FR). Následně jsou definovány dvě hodnoty FR. První hodnota je považována za vysoce pravděpodobnou, protože odpovídá aktuální situaci a vývoji v dohledné budoucnosti (zelené hodnoty v obr. 49). Druhá hodnota popisuje budoucí situaci s velmi nízkou pravděpodobností, ale s vážným dopadem, a proto ji nelze vyloučit (červené hodnoty v obr. 49). Kombinace rizikových faktorů vytváří sadu uvažovaných scénářů. Tyto scénáře jsou následně spočítány v nástroji *NERUDA*.

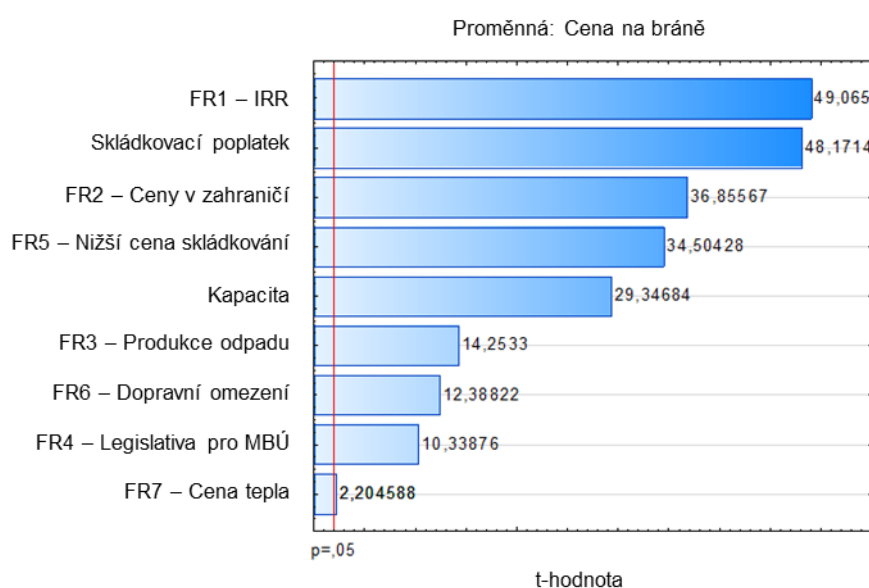


Obr. 49: Příklad výsledků analýzy rizik - grafické znázornění

Na rozdíl od předchozích simulací (např. kap. 7.1), se tato analýza snaží najít maximální poplatek na bráně, který poskytuje dostatečné množství odpadu ($m_{wa} = C_{REF}$). Tento princip je znázorněn na obr. 44 (vertikální pohyb). Výpočet se provádí v několika iteracích, kdy se poplatek na bráně sledovaného projektu postupně zvyšuje, dokud je k dispozici dostatek odpadu pro plánovanou kapacitu ($m_{wa} > C_{REF}$). Výpočet byl opakován pro různé skládkovací poplatky, aby bylo možné získat ucelený obraz FR. Na obr. 49 je znázorněn příklad výsledků

analýzy rizik. Ve výpočtech C_{REF} odpovídá 200 kt/r a skládkovací poplatek je nastaven na 2200 Kč/t. Poplatky na bráně jsou zobrazeny v sestupném pořadí, a ve vztahu k průměrné hodnotě.

Další možností, jak interpretovat výsledky výpočtů, je definovat dopad změn jednotlivých faktorů na změnu poplatků na bráně – vyjádřeno pomocí Paretova diagramu uvedeného na obr. 50. Zde byla testována statistická významnost rizikových faktorů na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Obr. 50 dokladuje, že všechny vybrané FR jsou statisticky významné na uvažované hladině významnosti. FR7 (vývoj cen tepla v ostatních lokalitách) je těsně nad testovacím kritériem. Mezi nejrizikovější faktory patří FR1, FR2 a FR5. Do analýzy byly přidány parametry: kapacita zařízení a skládkovací poplatek. Oba tyto parametry se ukázaly jako klíčové pro ekonomickou návratnost investice. U všech těchto FR by měla následovat detailní analýza s cílem odhadnout budoucí scénáře jejich vývoje.



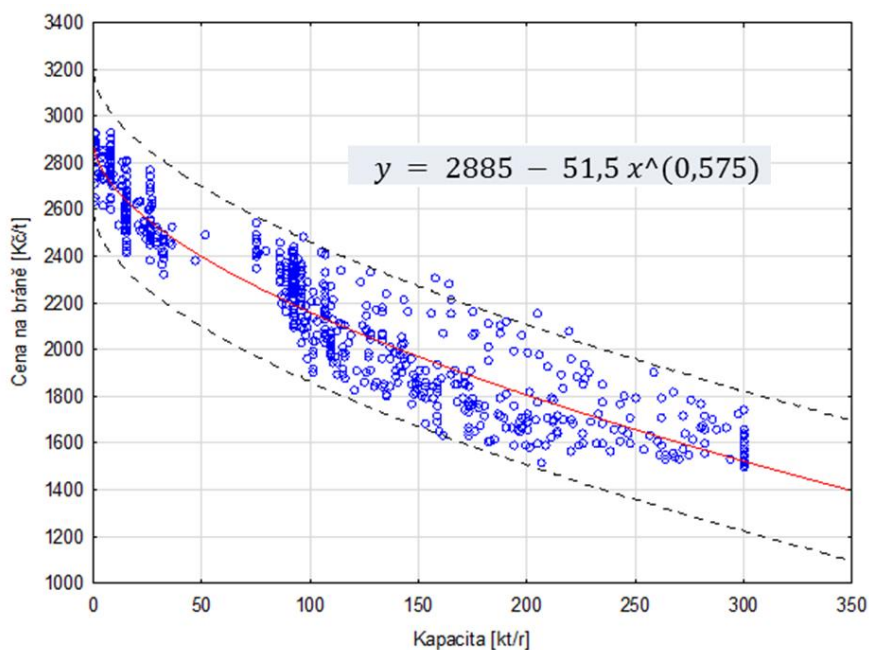
Obr. 50: Význam rizikových faktorů ve vztahu ke změnám ceny na bráně

Tato kapitola se zabývala metodikou pro komplexní analýzu rizik spojených s výstavbou a provozováním zařízení EVO. Na rozdíl od jiných prací na toto téma se zde šlo nad rámec pouhého seznamu pokynů pro identifikaci rizik bez další kvantifikace, a předložil se komplexní postup pro deterministické určení dopadu rizik na ekonomiku zařízení, tj. stanovení poplatku na bráně a *IRR*.

7.3 Návrh klíčových prvků zařízení EVO – z pohledu investora

Případová studie v této kapitole aplikuje model z kap. 3 a závislost ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě z výpočtového nástroje *NERUDA* popsáno v kap. 4. Uvažované technologické řešení je uvedeno na obr. 11. V první části případové studie budou blíže popsány hlavní neurčitosti vstupující do optimalizační úlohy pomocí nástroje *NERUDA* (předběžné posouzení lokality). Druhá část bude zaměřena na detailní plánování projektu.

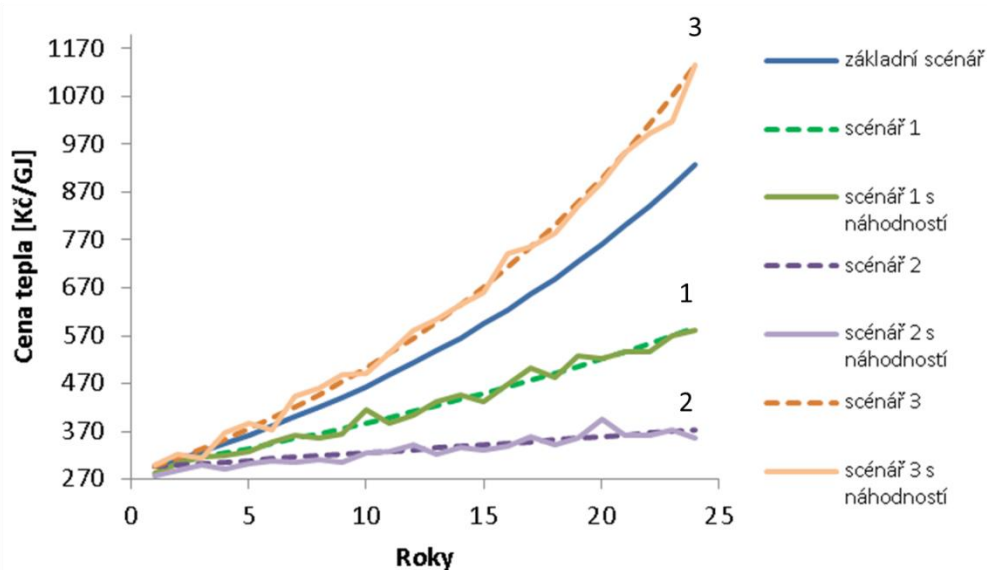
Jak již bylo zmíněno v kap. 3, hlavní neurčitostí této úlohy je cena na bráně, která zajišťuje sledovanému zařízení EVO dostatek odpadu vzhledem k jeho kapacitě. Pro tento účel byla uvolněna cena na bráně (byl rozšířen interval pro požadované *IRR*) pro sledovaný projekt, která byla náhodně generována v opakovaných výpočtech. Výstupem z logistické úlohy je závislost ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě. Z opakovaného výpočtu pomocí metody Monte Carlo je k dispozici dostatek dat pro získání regresního modelu popisující zmiňovanou závislost. Konkrétní funkce je uvedena na obr. 51. Je vhodné zmínit rozdíl mezi uvedenými obr. 13 a obr. 51. Vypadají podobně, ale z pohledu projektu je obr. 13 vstup (co by si investor přál) a obr. 51 je výstup (čeho lze reálně dosáhnout).



Obr. 51: Závislost ceny na bráně na kapacitě zařízení EVO

Tyto výsledky vznikly za určitých předpokladů (výše skládkovacího poplatku, poptávka po teple u konkurenčních projektů, propustnost dopravních uzlů, eskalace cen energií, jiné projekty zpracovávající odpad apod.). Do výsledků mohou promluvit i další faktory (např. vývoz odpadu do zahraničí). Pro posouzení dalších rizik ovlivňující konkurenční boj o odpad je třeba tyto vlivy vnést do úlohy a stanovit tak dopad na výnosnost investice (odraz do ceny na bráně). V případě, že investor zváží všechny potenciální rizika, může následně od projektu požadovat patřičné *IRR*, které bude odpovídat současné situaci na finančních trzích a míře rizika konkrétního projektu.

Výroba energie a její export spotřebiteli představuje klíčový faktor pro energeticky efektivní a ekonomicky proveditelný provoz [77]. Predikovat ceny elektřiny pro příštích několik let představuje velmi složitou úlohu, které se věnují experti z dané oblasti. V této studii se vycházelo z jednoduchého modelu, který je založen na každoročním navyšování ceny o určité procento. Cena nákupu tepla z EVO třetí osobou (např. CZT) je lokálně závislá. Je ovlivněna mnoha faktory (např. poptávkou v síti CZT, podílem tepla dodaného zařízeními EVO z celkové dodávky, dostupností a cenou fosilních paliv). Přístup pro odhad budoucího vývoje cen tepla a elektřiny, který byl použit v tomto modelu, je uveden dále v textu. Z pohledu tepla, je obecně očekáván růst cen. Příklady možného vývoje ceny tepla v příštích několika letech je uveden na obr. 52.



Obr. 52: Základní scénář vývoje ceny tepla a ukázka tří náhodně vygenerovaných scénářů vývoje

Model růstu ceny tepla je založen na faktu omezených zásob uhlí v České republice a dalšími náklady spojenými se snížením emisí, které jsou nezbytně nutné pro splnění přísných emisních limitů stanovených pro uhelné elektrárny [77]. Rostoucí ceny tepla mají příznivý vliv na ekonomiku EVO. Konečná cena je ale omezena maximální přijatelnou cenou pro koncové odběratele ze sítě CZT. Jakmile je tato hranice překročena, je možné masivní odpojení zákazníku od CZT. Toto nebezpečí vytváří vážnou hrozbu pro celou síť CZT a zvyšuje tlak na snížení ceny tepla z EVO. Tato situace je ve výpočtu uvažována v jednom scénáři, který uvažuje výrazné snižování poptávky po teple a v konečném důsledku vede k rozpadu sítě CZT. Konkrétní kritický trend scénáře je uveden v tab. 19 (scénář SCZT3).

Tab. 19: Scénáře vývoje poptávky po teple (SCZT).

Scénáře	SCTZ1	SCZT2	SCZT3
Snižování poptávek po teple za rok	0 %	1 %	5 %

U scénářů pro vývoj poptávky po teple se předpokládala stejná pravděpodobnost realizace. Tato neurčitost se při testovacích výpočtech ukázala jako zcela klíčová pro konečné navrhované řešení (optimální kapacita). Z důvodu této extrémní citlivosti byla neurčitost v podobě poptávky po teple uvažována ve více scénářích pro všechny výpočty najednou (přístup „here and now“). Obecně platí, že díky tomu je poskytnuto robustní řešení pro jakoukoli uvažovanou realizaci neznámého parametru (např. poptávka po teple). Tři scénáře pro vývoj možného vyvedení tepla z jednotky EVO v průběhu životnosti zařízení jsou uvedeny v tab. 19.

V modelovém příkladu se předpokládá relativně velká síť CZT s celkovou spotřebou tepla okolo 2 TJ za rok. Poptávka je rozdílná v průběhu roku (viz tab. 20). Možnost dodávek tepla do systému CZT má zásadní vliv na rozhodnutí o počáteční investici, protože ovlivňuje výběr

typu turbíny (protitlaká nebo častěji kondenzační odběrová turbína) a jejím výkonu. Rozložení poptávek je klíčové pro optimální řízení provozu zařízení. Informace o optimálním provozu je dalším výstupem prezentovaného nástroje. Počáteční hodnoty poptávky po teple v každém měsíci byly stanoveny na základě skutečných provozních údajů (tab. 20).

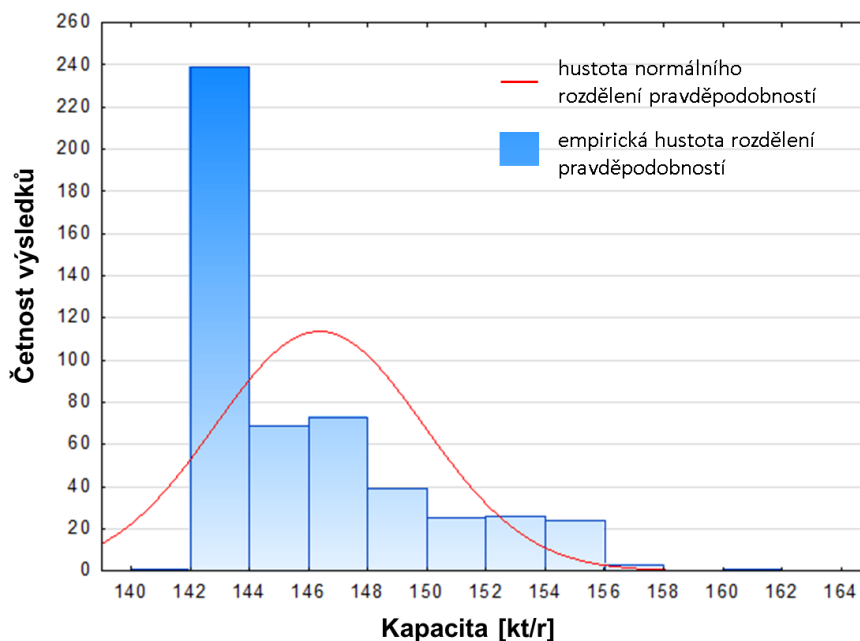
Tab. 20: Hodnota poptávek po teple v průběhu roku

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Poptávka po teple [TJ]	322	252	250	123	16	81	79	73	43	153	248	319

Dalšími neurčitostmi jsou ceny energií (tepla a elektřiny). Citlivost se zde projevuje ve změně ekonomiky projektu představenou hodnotou *IRR*. Z tohoto důvodu byla použita metoda Monte Carlo (opakované generování několika scénářů a optimalizace řešeného problému, viz níže), která umožňuje odhad optimálních hodnot rozhodovacích proměnných pro zařízení EVO. Výstupem je popsání vlivu změn těchto neznámých náhodných parametrů (tj. ceny energií) na hodnotu *IRR*. Taková analýza rozšiřuje metodiky a případové studie prezentované v [75] a [78]. Byl proveden výpočet 500 různých scénářů pro různě generované ceny elektřiny a tepla (viz obr. 52). Uvažované zvyšování cen elektřiny a tepla je založeno na historických hodnotách a předpokládaném vývoji v důsledku inflace. Základním scénářem je konstantní růst 5 % ročně. Jednotlivé scénáře se dále generovaly za použití normálního rozdělení pravděpodobnosti. Střední hodnota ročního růstu je nastavena v souladu se základním scénářem 5 % a směrodatná odchylka je odhadnuta na 1,5 %. Použitím těchto parametrů normálního rozdělení pravděpodobnosti se generované ceny energií pohybují v rozmezí 0,5 % až 9,5 % se spolehlivostí přesahující 99 %. S ohledem na hodnotící kritérium v podobě *IRR*, které je založeno na peněžních tocích v rámci jednotlivých let, je vhodné simulovat riziko v podobě nekonstantního růstu cen energií. Proto byly pro všechny roky modelovány změny rychlosti růstu, které udávaly konečnou cenu pro jednotlivé roky daného scénáře. Průměrná hodnota změny je 0 % a směrodatná odchylka byla zvolena 3 %. Tento jev se snaží simulovat nestabilní ekonomický vývoj trhu s energiemi. Příklady několika náhodně generovaných scénářů ceny tepla jsou znázorněny na obr. 52.

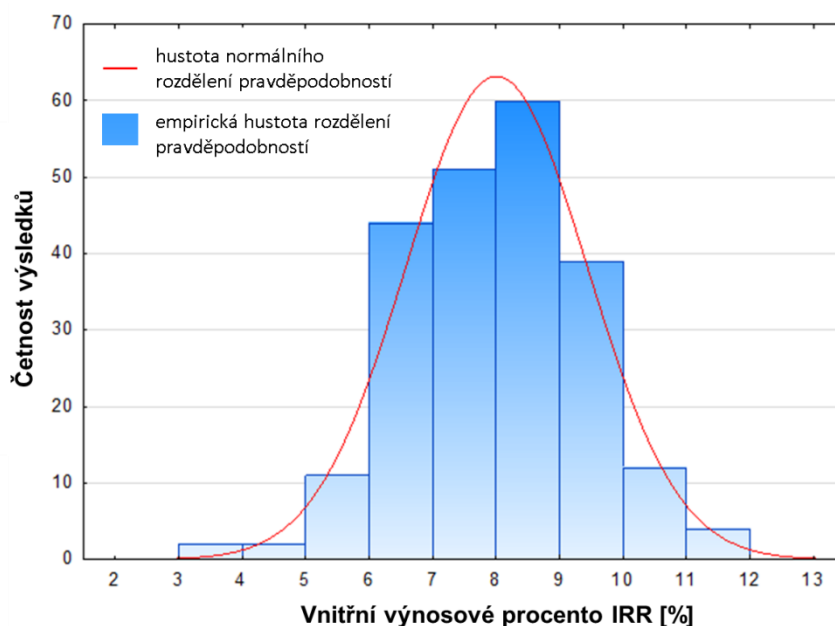
Výsledky výpočtů

Modelový výpočet založený na dvoustupňovém stochastickém programování obsahuje tři scénáře pro vývoj množství uplatněného tepla se stejnou pravděpodobností realizace. Všechny tři scénáře byly zahrnuty do účelové funkce najednou. Pro citlivost výsledku na změně cen energií je počítáno 500 scénářů pro náhodně generované vývoje cen za teplo a elektřinu. Hlavním výsledkem je optimální návrh kapacity zařízení a hodnota *IRR*. Histogram optimálně navržených kapacit je znázorněn na obr. 53.



Obr. 53: Histogram optimálních kapacit

Ukazuje se, že vypočtené kapacity nejsou normálně rozděleny. Většina výsledků optimalizační úlohy navrhla kapacitu okolo 142 kt/r. Medián vyšel v hodnotě 144 kt/r. Průměr ze všech výpočtů je mírně vyšší – 147 kt/r. Tyto indikátory ukazují na nesymetrické rozložení výsledků, kde převážná většina je vlevo od střední hodnoty. Pouze několik výsledků navrhlo mírně vyšší kapacitu přesahující 150 kt/r, tyto výsledky nastaly za specifických podmínek, kdy byl vývoj cen energií na maximálních uvažovaných úrovních. Výsledky kapacitních řešení jsou celkově poměrně stabilní pro všechny scénáře vývoje cen energií. Vývoj ovlivňuje hlavně ekonomiku projektu, zastoupenou *IRR* (obr. 54). Získané návrhy kapacit odpovídají dimenzování turbíny, její výkon při kapacitě 142 kt/r je přibližně 9,1 MW. Přehled hlavních parametrů souvisejících s optimálním návrhem je uveden v tab. 21.



Obr. 54: Histogram kritéria IRR

Histogram hodnoty *IRR* je k dispozici pro vybrané kapacity 142 kt/r na obr. 54. *IRR* je vyšší než 6 % pro většinu simulací (asi 95 %). Výsledky ukazují, že *IRR* je možné očekávat s největší pravděpodobností v intervalu 8 – 9 %, viz obr. 54. Minimální *IRR*, které je požadováno investory, nemůže být zobecněno. Požadavek na *IRR* se může určit metodou CAPM popsanou v kap. 2. Pro projekt EVO v ČR byl odhadnut požadavek na *IRR* pro danou investici okolo 10 %, z tohoto pohledu je hodnota *IRR* z většiny výpočtů optimalizační úlohy nízká. Pro zajištění zvýšení *IRR* by bylo třeba pozitivně změnit peněžní toky v průběhu provozu. Toho se dá dosáhnout např. legislativní podporou, vyšší výkupní cenou tepla do CZT nebo zvýšení ceny na bráně. Další zvýšení *IRR* může být dosaženo podrobnou optimalizací subsystémů zařízení, s cílem získání kompromisu mezi investicí a provozními náklady (konstrukcí kotle a opatřeními zabraňující korozi, účinností turbíny, technologií systému čištění spalin, technologií umožňující zvýšené materiálové využití, atd.).

Tab. 21: Hlavní vstupy/výstupy optimalizační úlohy

	Vstupy / výsledky hodnoty (průměr/modus)	Směrodatná odchylka	Poznámka
Vnitřní výnosové procento, <i>IRR</i> [%]	8,1	1,6	obr. 54
Zpracovatelská kapacita [kt/r]	142	3,7	obr. 53
Zpracování odpadu [t/h]	17,5		provozní doba 8000 h/r
Výhřevnost odpadu [GJ/t]	9,5		
Výkon kotle [MW]	48,2		
Účinnost kotle [%]	81		
Teplota páry [°C]	400		
Tlak páry [MPa]	4		
Teplota napájecí vody [°C]	129		
Parní průtok na výstupu kotle [t/h]	54		
Maximální výstup z turbíny (provoz orientovaný na výrobu elektřiny) [MW]	9,1	0,2	
Maximální výstup z turbíny (provoz orientovaný na výrobu tepla) [MW]	3,6		
Termodynamická účinnost turbíny [%]	77		
Elektromechanická účinnost turbíny [%]	88		
Tlak v odběru [MPa]	1,5		
Kondenzační tlak [MPa]	0,01		
Výkon kondenzátoru [MW]	25,2	0,5	
Export tepla [TJ/r]	786,5	20,228	
Výroba elektřiny [MWh/r]	37 096	1386	
Export elektřiny [MWh/r]	17 093	633	

7.4 Modelování vlivu vývoje legislativy na systém nakládání s odpady – z pohledu státu

Ukázková aplikace popsaná v této části textu modeluje vývoj OH v ČR v případě postupného zvyšování skládkovacího poplatku. Předmětem zájmu je analýza na úrovni celé ČR. Analýza byla provedena v roce 2014 v období před platností zákazu skládkování neupraveného KO. V samotném výpočtu byl nástroj *NERUDA* obohacen o řídicí platformu, která umožňuje řídit posloupný výpočet v rámci předem definovaného období.

Cíle výpočtů

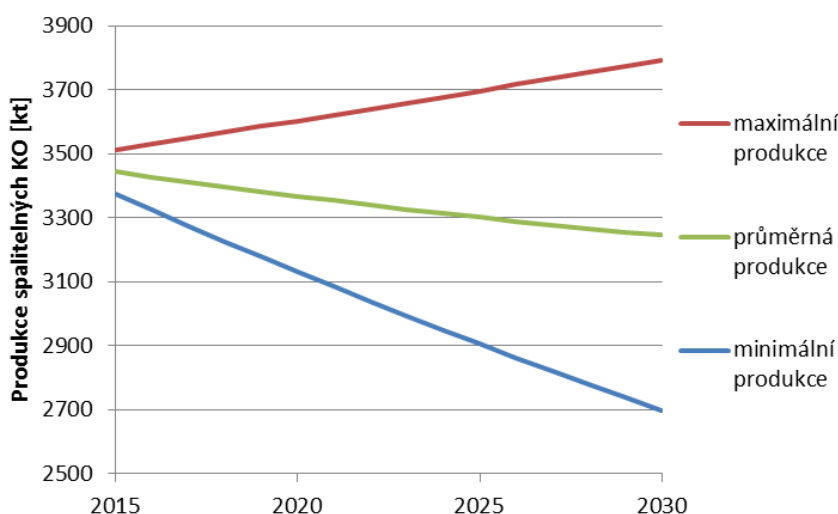
Cílem výpočtů bylo simulovat možný tok spalitelných odpadů (vhodných pro EVO) v období 2015 – 2030. Poměr využití jednotlivých technologií je ovlivněn zejména hodnotou skládkovacího poplatku. Hlavním výstupem je vyhodnocení splnění legislativního cíle, tj. odklon neupravených KO od skládkování po roce 2020.

Okrajové podmínky výpočtu a výsledky

Pro výpočet byl využit optimalizační nástroj *NERUDA*, s jehož pomocí byl proveden sériový výpočet pro období 2015 až 2030. V jednotlivých letech byl simulován dopad různě zvoleného skládkovacího poplatku (1000 až 2200 Kč/t + kompenzační poplatek 500 Kč/t), a dále scénář zákazu skládkování neupraveného KO.

V rámci každého scénáře pro konkrétní rok a skládkovací poplatek byly generovány náhodné faktory ovlivňující výpočet. Parametry, u kterých je uvažována neurčitost jsou následující:

- **Produkce spalitelných odpadů:** byl uvažován rozsah meziroční změny v intervalu minus 1,5 % až plus 0,5 % (viz obr. 55). V tomto rozmezí se pro každou simulaci (1000 simulací pro každý scénář) generovala náhodná hodnota, která vstupovala do výpočetního nástroje *NERUDA*. Referenční hodnota v roce 2014 pro množství spalitelných KO byla na základě existujících trendů vypočítána na 3 475 kt/r. Tato hodnota vznikla jako součet produkcí spalitelných KO v jednotlivých ORP. V každém ORP byl odhad proveden na základě historických dat (trendu) v letech 2008 až 2012 (viz kap. 4.4.3).



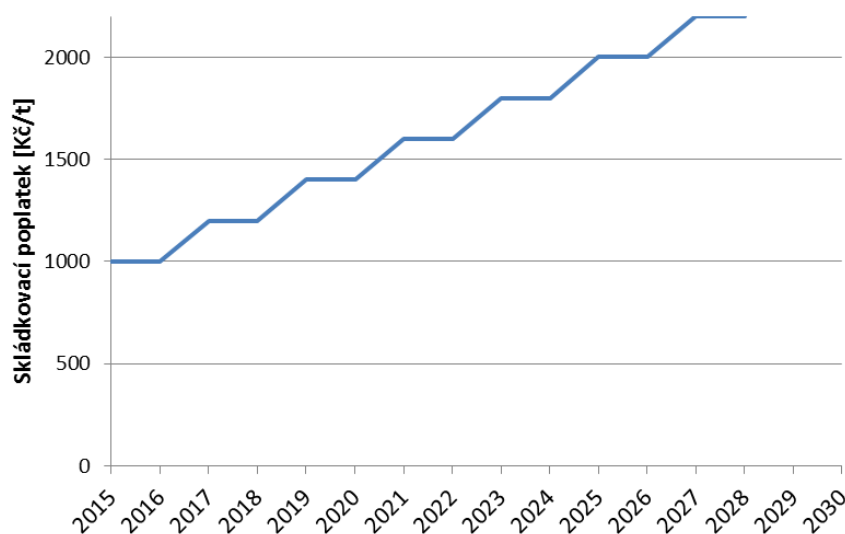
Obr. 55: Hraniční scénáře pro vývoj produkce KO vhodného pro energetické využití

Dolní hranice meziroční změny koresponduje se scénářem produkce SKO uvedeným v POH ČR. MŽP předpokládá, že do roku 2024 dojde k výraznému nárůstu separace materiálově využitelných a BRKO dnes obsažených v proudu SKO. V souladu s obr. 3 za podmínky uplatnění vzniklých produktů na trhu (uplatnění druhotných surovin, uplatnění kompostu) by došlo k výrazné redukci množství spalitelných odpadů.

- **Rok spuštění provozu nových projektů:** u každého typu projektu se uvažuje s různou dobou fáze výstavby. Pro zařízení EVO s kapacitou 100 – 400 kt/r se uvažoval možný provoz od roku 2022 (spuštění ZEVO Chotíkov se předpokládalo v souladu s plánem projektu na rok 2016). U nižších kapacit v rozsahu 10 – 40 kt/r se uvažovalo kratší období výstavby a plánované spuštění bylo nastaveno od roku 2020 (výjimkou je projekt v lokalitě Cheb, který je již v přípravné fázi, zde se uvažoval možný rok spuštění už od roku 2018). U existujících zařízení EVO se uvažuje možné rozšíření o jeden kotel od roku 2020. Možné spuštění provozu zařízení MBÚ bylo uvažováno od roku 2016. Stejný rok spuštění byl uvažován i u překládacích stanic.
- **Maximální kapacity nových a existujících projektů v konkrétních lokalitách:** na rozdíl od předchozích výpočtů je nyní uvažováno s dvěma typy kapacitních řešení pro zařízení EVO. Nízkokapacitní do 40 kt/r a větší zařízení od 100 kt/r. Konkrétní technologické řešení vychází z [79]. Nízkokapacitní jednotky se uvažovaly v lokalitách Cheb, Jihlava 2x, Františkovy lázně, Třebíč, Hodonín, Trutnov, Náchod, Písek. Pro větší nová zařízení EVO byly uvažovány vždy tři kapacitní varianty – 100, 150 a 200 kt/r pro lokality České Budějovice, Most, Ústí nad Labem, Přerov, Zlín, Jihlava a 200, 300 a 400 kt/r pro lokality Mělník, Opatovice, Karviná (vyšší kapacita byla uvažována z důvodu vyšších dodávek tepla). U existujících lokalit bylo uvažováno možné rozšíření o cca polovinu současné kapacity. V případě zařízení MBÚ byla uvažována pro všechny simulace maximální zpracovatelská kapacita 60 kt/r.
- **Náklady na přepravu:** na základě T-E modelu byl vytvořen odhad nákladů na silniční přepravu. Pro přepravu nelisovaného odpadu byl stanoven interval ceny 3,5 – 6,8 Kč/km.t. U lisovaného a přepravy LF bylo stanoveno rozmezí 2,9 – 4 Kč/km.t. Pro další zpřesnění výsledků je doporučeno uvažovat cenu za dopravu v závislosti na přepravované vzdálenosti. Tímto bodem se zabývala diplomová práce [37]. Pro zanesení nelineární závislosti ceny na vzdálenosti do modelu, bude nutná modifikace dopravní sítě a úprava výpočtového modelu. Tím se výrazně zvýší časové nároky na výpočet. Proto je nutná další činnost spojená se zvyšováním efektivity výpočtového nástroje *NERUDA*.
- **Ceny za zpracování odpadu:** pro každou uvažovanou lokalitu se z T-E modelu stanovily závislosti poplatku za zpracování na zpracovatelské kapacitě. Tyto závislosti představovaly různé požadavky na výnosnost investice. Hodnotícím kritériem bylo zvoleno *IRR*, u kterého se uvažoval interval 4 – 10 %.

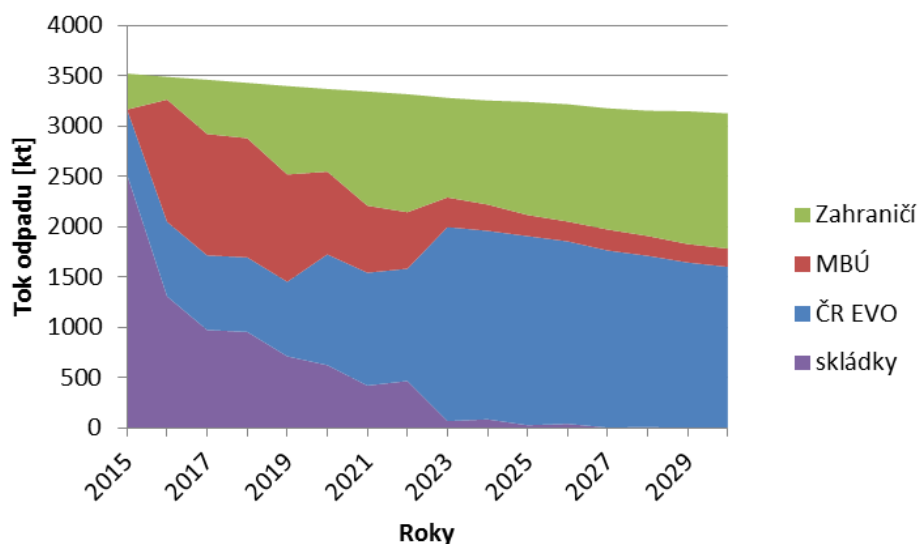
Výsledky testovacích výpočtů nástrojem *NERUDA*

Výstupem z každého výpočtu nástroje *NERUDA* je doporučení zpracovatelských kapacit v uvažovaných lokalitách pro nové projekty (EVO, MBÚ). Jako příklad lze uvést mapu na obr. 43. Mapa se v jednotlivých výpočtech (scénářích) mění. Dále výstupy poskytují informaci o toku odpadu – využití jednotlivých hran silniční a železniční sítě. Pomocí analýzy velkého počtu výpočtů lze statisticky odhadnout možný tok odpadu (v návaznosti na výstavbu nových projektů) v důsledku změny legislativních podmínek v OH. Pro výpočty prezentované v této části textu byl zvolen právě jeden scénář a to přibližně lineární vývoj skládkovacího poplatku (viz obr. 56).



Obr. 56: Vývoj skládkovacího poplatku pro ukázkový příklad

Od roku 2028 je uvažován zákaz skládkování neupraveného KO. V každém roce pro stanovený skládkovací poplatek bylo provedeno 1000 simulací při různě generovaných vstupních parametrech (neurčitosti výpočtu). Takové množství simulací pro každý scénář s sebou nese velkou časovou náročnost nejen na samotný výpočet, ale hlavně i na následné zpracování výsledků. Počet scénářů (bylo uvažováno 16 roků x 8 hodnot skládkovacího poplatku) navíc ovlivňuje rozsah přípravných prací před výpočtem. Příležitostí pro další vývoj nástroje je zvýšit automatizaci přípravy dat a zpracování výstupu a zefektivnění samotného výpočtu v rámci nástroje *NERUDA*. Dosažené výsledky umožnily zpracovat průměrné rozložení toku odpadu ve sledovaném období (viz obr. 57).



Obr. 57: Způsob zpracování odpadu – průměrný stav

Z obr. 57 je vidět trend klesající produkce odpadu. Ten je dán zvoleným intervalem meziroční změny -1,5 až 0,5 % (střed intervalu je -0,5 %, což odpovídá i výsledkům výpočtu). Na obr. 58 jsou hodnoty uvedeny v procentech.



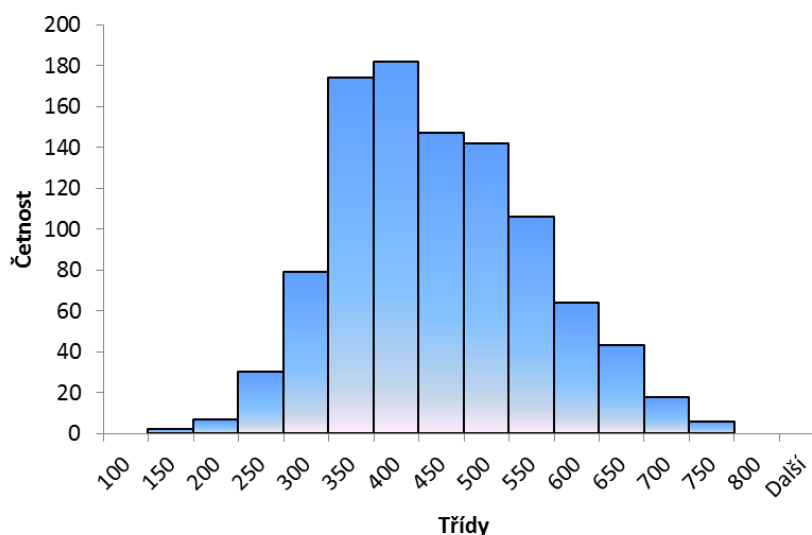
Obr. 58: Způsob zpracování odpadu v procentech – průměrný stav

Uvedené grafy ukazují ekonomickou konkurenceschopnost jednotlivých technologií. V praxi je nutné počítat s časovou prodlevou nutnou k realizaci nových projektů. Dále je nutné správně chápat prezentované veličiny. V grafech na obr. 57 a obr. 58 jsou uvedeny průměrné hodnoty z 1 000 výpočtů. Pro detailnější rozbor je třeba analyzovat i další ukazatele.

Česká republika přijala dle [17] o skládkování odpadů závazek minimalizovat skládkování, tj. snížit množství BRKO ukládaného na skládky. Podrobný popis s konkrétními limity je uveden v kap. 1.2. Dle údajů v navrženém POH se předpokládá 48% podíl BRKO v SKO.

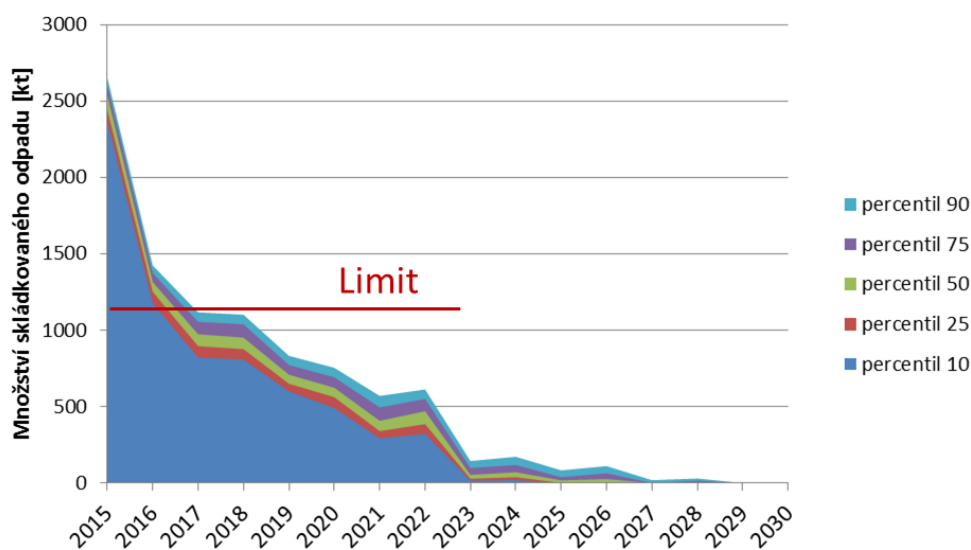
Pokud uvažujeme, že na skládky půjde pouze BRKO obsažený v SKO, pak je možné po roce 2020 skládkovat nanejvýš 1 116 kt SKO.

Pro ukázkou je na obr. 59 uveden histogram výsledků celkového množství KO odstraněno skládkováním pro scénář: skládkovací poplatek 1600 Kč/t, rok 2021.



Obr. 59: Histogram množství skládkovaného odpadu v roce 2021 při skládkovacím poplatku 1600 Kč/t [kt/r]

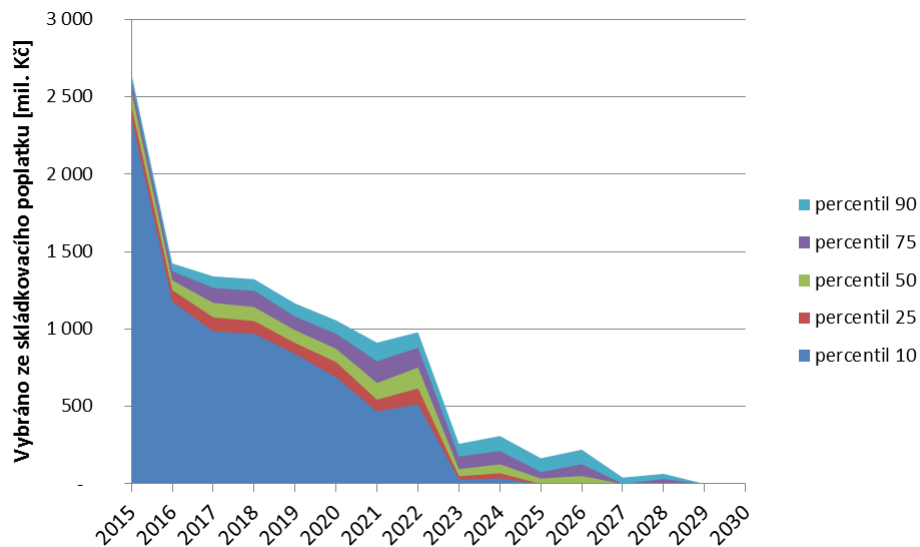
Průměrná hodnota uvedená v grafu na obr. 59 je 421 kt/r. Výsledky se pohybují v poměrně velkém rozsahu od 136 – 727 kt/r. To je dáno velkým počtem uvažovaných neurčitostí. Na základě rozboru dat lze odhadovat pravděpodobnost překonání (resp. nepřekonání) určité hranice. Případně hledat hranici pro danou pravděpodobnost. Na obr. 60 je uvedené množství odpadu pro percentily 10; 25; 50 (medián); 75; 90. Výsledky jsou uvedeny pro scénář vývoje skládkovacího poplatku, který je zobrazen na obr. 56.



Obr. 60: Vyhodnocení množství odpadu odstraněno skládkováním

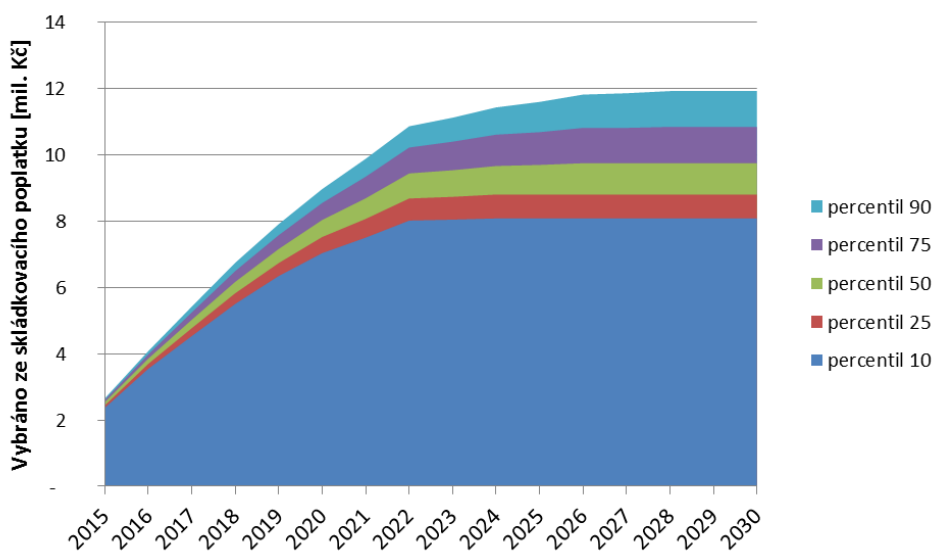
Na obr. 60 je zobrazena limitní hodnota pro množství skládkovaného KO v roce 2020. Pro uvažovaný scénář je tedy splněn s rezervou závazek odklonu od skládkování. Konkrétní vývoj skládkovacího poplatku lze dále zpřesňovat na základě daných preferencí na výsledek. Za bezpečnou hranici je možné považovat percentil 90 (90 % výsledků mělo nižší hodnotu).

Důležitým výstupem je informace o částce, která byla vybrána ze skládkovacího poplatku. Situace pro již zmíněný scénář (obr. 56) je uvedena na obr. 61.



Obr. 61: Částka vybraná ze skládkovacího poplatku v daném roce

Dostupná finanční hotovost, kterou je možné použít pro další rozvoj OH v kumulativní podobě, je na obr. 62.



Obr. 62: Částka vybraná ze skládkovacího poplatku kumulativně

Výstupy z výpočtů umožňují analyzovat možné následky zavedení legislativních změn do systému OH. Pomocí těchto výstupů je možné plánovat posloupnost zaváděných změn s kontrolovaným rizikem nesplnění vytyčených cílů. V důsledku turbulentního charakteru prostředí a celé řady neurčitých faktorů je vhodné celý výpočet aktualizovat a nové poznatky vnášet do řízení celého procesu.

Klíčové parametry, které ovlivní splnění závazku ČR odklonit vytyčené množství odpadu od skládkování, jsou následující:

- včasná změna legislativy,
- vývoj produkce SKO,
- vývoj OH v zemích EU,
- vývoj separace v ČR.

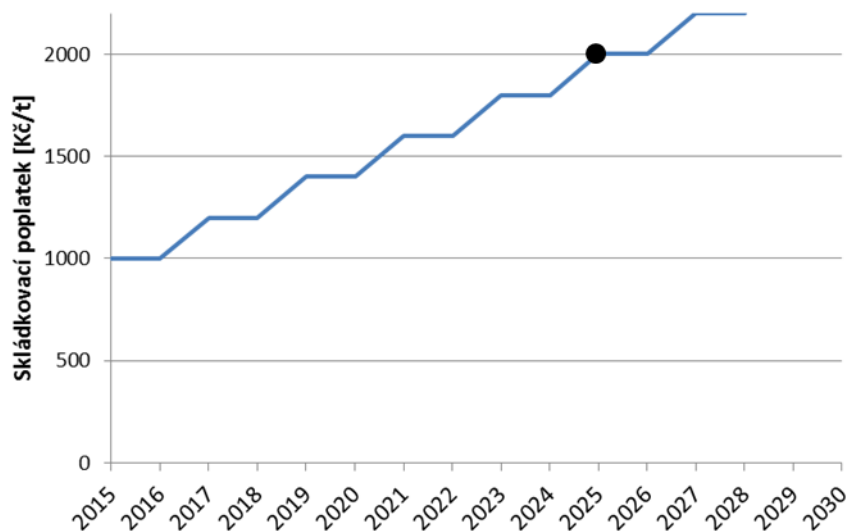
Provedené testování nástroje, které je prezentováno v této části práce, potvrdilo jeho funkčnost a použitelnost pro praktické výpočty. Současně odhalilo další potenciál pro jeho následné vylepšení a to zejména z pohledu zvyšování automatizace procesů před a po výpočtu. Relevantnost výsledků je možné výrazně zvýšit další činností zaměřenou na zpřesňování vstupních parametrů a okrajových podmínek výpočtového systému.

7.5 Analýza zaměřená na producenty odpadu – případová studie nástroje *PIGEON*

Předchozí kapitola sumarizovala výsledky bilančních výpočtů, v rámci kterých byl modelován možný budoucí tok odpadu mezi producenty a koncovými zařízeními v následujících letech. Následující text se zabývá ekonomickou stránkou problému a hodnotí možnosti modelování dopadu legislativních změn na cenu za zpracování z pohledu producentů. Analýza je prováděna opět na úrovni regionů a z technického pohledu představuje další zpracování hlavních výsledků získaných z výpočtů nástroje *NERUDA* (tzv. postprocessing, viz kap. 6). V této části textu je představeno pilotní testování nástrojů vyvinutých pro tento účel. Jedná se o nástroj *PIGEON* a přístup založený na shlukové analýze. V následujícím textu bude zmíněna vazba nástrojů ve vztahu k řešení praktických úloh.

7.5.1 Okrajové podmínky výpočtu

Pomocí nástroje *PIGEON* je možné hlouběji analyzovat tok odpadu v případě jeho spojení v nějakém uzlu s následným rozdělením dále v dopravním řetězci. Pro ukázkovou studii byl využit výpočet z kap. 7.4 pro rok 2025 (označený černým bodem, viz obr. 63).



Obr. 63: Vývoj skládkovacího poplatku ukázkového příkladu s označeným rokem pro následnou analýzu

7.5.2 Ukázka shlukové analýzy na výstupních datech z nástroje *NERUDA*

Jak je naznačeno v předchozím textu, použití nástroje *PIGEON* je časově náročné, pokud je potřeba analyzovat velké množství scénářů. K redukci počtu scénářů se využívá shluková analýza, která uspořádává výsledky scénářů z nástroje *NERUDA* do shluků a poté se pro *PIGEON* vybere reprezentant každého shluku.

Pro náš ukázkový výpočet bylo zvoleno 30 shluků (hranice pro výběr je uvedena na obr. 39). Rozložení četností mezi jednotlivými shluky pro rok 2025 je uvedeno v tab. 22. Pro systém shlukování bylo vybráno 80 proměnných, které představovaly dopočítanou zpracovatelskou kapacitu v uvažovaných lokalitách (jednalo se pouze o zařízení EVO v ČR a zahraničí) a cenu na bráně jednotlivých zařízení v daném scénáři.

Tab. 22: Počty prvků ve shlucích

Shluk	Počet prvků	Shluk	Počet prvků	Shluk	Počet prvků
1	53	11	39	21	21
2	92	12	1	22	46
3	91	13	57	23	19
4	77	14	7	24	6
5	89	15	27	25	1
6	3	16	23	26	16
7	86	17	32	27	23
8	23	18	33	28	18
9	32	19	25	29	10
10	32	20	10	30	8

Pro bližší představu je detailní výpis scénářů, které spadají do shluku č. 15 ve výpočtu pro rok 2025, uveden v tab. 23.

Tab. 23: *Vzdálenost prvků od centroidu shluku 15*

scénář	Vzdálenost od centroidu [-]	scénář	Vzdálenost od centroidu [-]	Scénář	Vzdálenost od centroidu [-]
15	4,79	406	5,00	658	5,19
83	5,29	419	5,09	707	5,00
176	5,09	471	5,19	743	5,38
191	5,09	480	5,09	808	5,09
199	5,29	523	5,09	868	6,00
282	5,19	543	5,56	955	4,89
295	5,38	568	5,19	970	5,47
369	5,19	599	5,19	981	5,00
378	5,00	620	4,69	989	5,29

Pozn.: Centroidem se rozumí těžiště shluku, je to vlastně hypotetický objekt mající souřadnice shodující se s průměrem všech souřadnic objektů daného shluku. Vzdálenost (podobnost) vychází z euklidovské vzdálenosti mezi analyzovanými parametry. Jelikož jde o různé jednotky (cena na bráně v Kč/t, kapacita v kt/r, atd.), jsou hodnoty znormovány, aby měly parametry adekvátní váhu mezi sebou. Jedná se tedy o bezrozměrnou hodnotu.

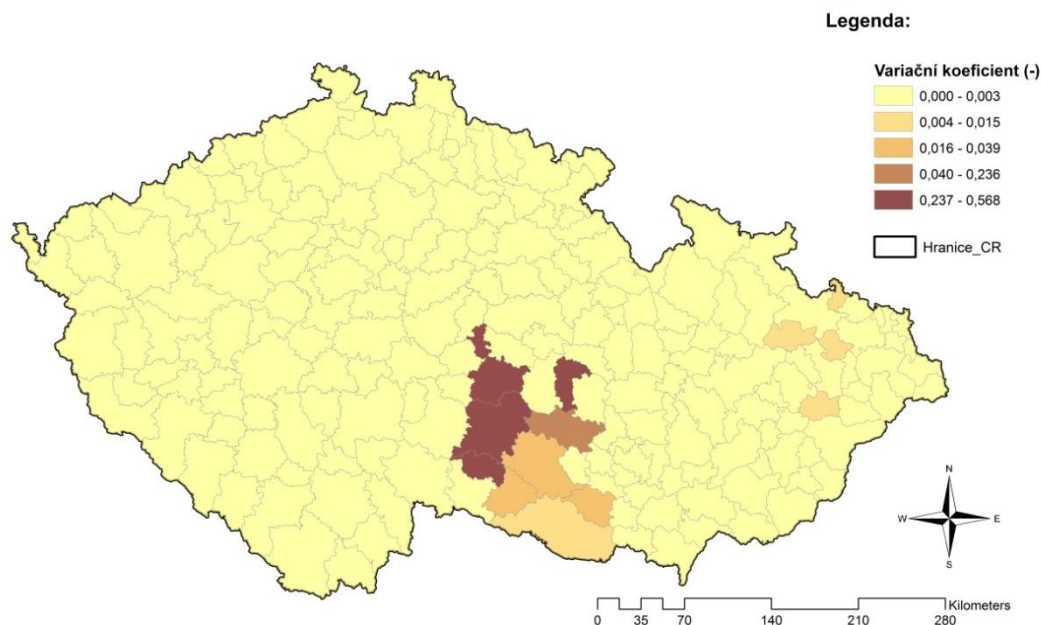
Z každého shluku byl vybrán jeden reprezentant (označeno v tab. 23), který se následně detailněji analyzoval v nástroji *PIGEON*. Každý výpočet (pro všechny reprezentanty shluků) byl proveden v 50 simulacích při různých vahách u jednotlivých ORP (viz kap. 5). Výběr reprezentanta byl proveden na základě nejmenší vzdálenosti od centroidu (těžiště shluku). Pro uvedený shluk v tab. 23 byl vybrán scénář číslo 620.

Z celkového počtu 80 parametrů vstupujících do analýzy se ukázalo 43 proměnných jako statisticky významných. Zbylých 37 parametrů se ve výsledcích pro různé okrajové podmínky výpočtu výrazně neměnilo, tím pádem se na tvorbě shluku významně nepodílely. Díky statistickému přístupu je možné analyzovat jednotlivé shluky, ale i konkrétní projekty (proměnné) a jejich vliv na směřování OH.

7.5.3 Výsledky testovacích výpočtů nástrojem *PIGEON* pro jeden shluk

Z důvodu simulování různého pořadí při výběru zpracovatele (viz výše) se mění celkové náklady pro producenta. Čím později producent přijde na řadu, tím víc se mu snižují možnosti výběru zpracování. U některých lokalit to v určitém scénáři vývoje okrajových podmínek v OH příliš nevádí, není pro ně v blízkém okolí konkurenční boj o zpracovatele. Naopak v jiných lokalitách může být tento efekt znatelný (výrazné zvýšení nákladů na zpracování odpadu). Grafická ukázka variability cen za zpracování v ČR pro jednotlivé ORP je uvedena na obr. 64. Výstup vychází z analýzy shluku č. 15 pro rok 2025. Variabilita je popsána variačním koeficientem (podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty – případně jejími

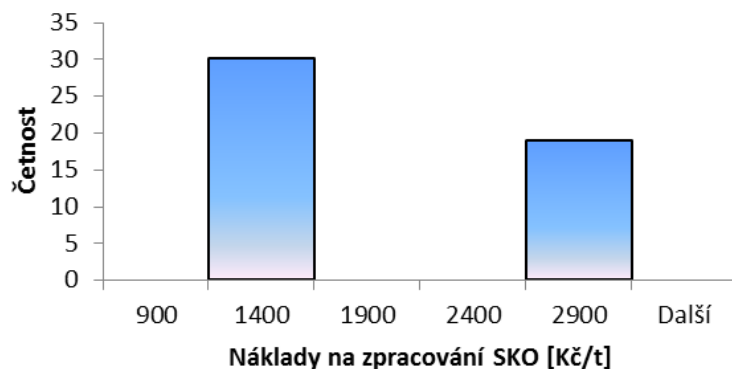
odhady s/\bar{x}). V případě nejvíce variabilních oblastí (ORP), z pohledu nákladů na zpracování odpadu, se výsledky mění v řádu desítek procent.



Obr. 64: Variabilita celkových nákladů na zpracování SKO pro ORP v ČR pro jeden shluk (možný scénář vývoje)

Většina ORP vykazuje nulový variační koeficient pro svoje náklady, protože je jasně dán právě jeden zpracovatel jejich odpadu. To ale platí pouze pro tento scénář (shluk). Z důvodu časové náročnosti budeme tento výsledek brát i pro ostatní scénáře ve shluku, který analyzovaný scénář reprezentuje. Dopouštíme se tím chyby, ta by ale měla být malá z důvodu podobnosti scénářů plynoucí ze shlukové analýzy. Analýza chyb a vhodný výběr reprezentanta (případně více reprezentantů z jednoho shluku) budou řešený v navazujících pracích při vývoji výpočtových nástrojů *NERUDA* a *PIGEON*.

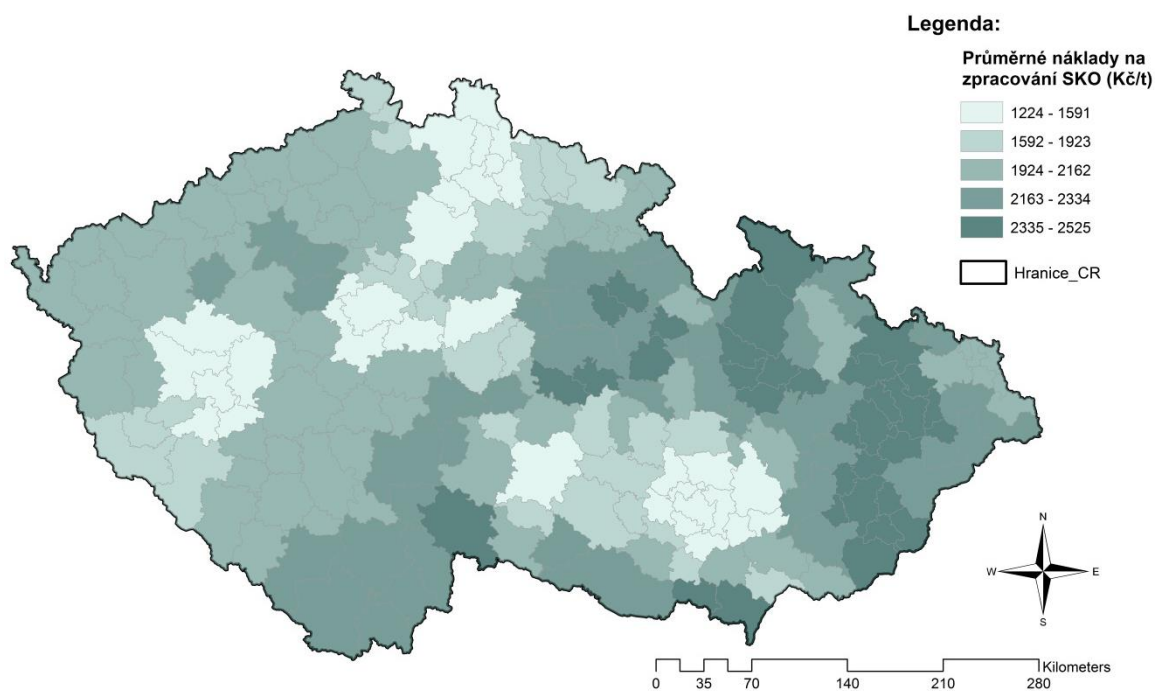
Detailněji se dá dále analyzovat konkrétní ORP. Histogram celkových nákladů v ORP Nové Město na Moravě pro shluk č. 15 a uvažovaný rok 2025 je uveden na obr. 65. Z grafu na obr. 65 je zřejmé, že pro ORP jsou k dispozici 2 alternativy (rozumné možnosti) zpracovatelů jejich SKO. V případě neaktivního přístupu osob zodpovědných za OH hrozí poměrně vysoké riziko (dle výpočtu asi 40 %) vyšších nákladů na zpracování SKO, řadově nárůst okolo 1500 Kč/t. Samozřejmě jde pouze o analýzu jednoho shluku (27 scénářů, což odpovídá asi 3 % ze všech výpočtů) ze série výpočtů pomocí nástroje *NERUDA*.



Obr. 65: Histogram celkových nákladů na zpracování SKO v ORP Nové Město na Moravě v roce 2025

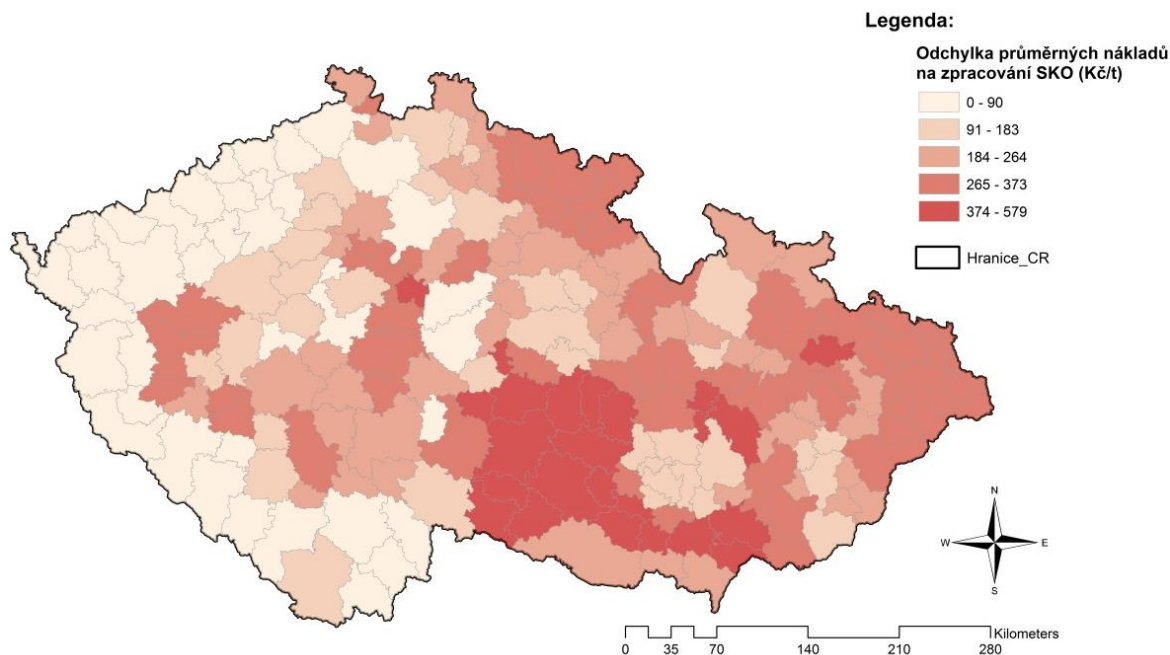
7.5.4 Výsledky testovacích výpočtů nástrojem PIGEON pro více shluků

Prozatím byla představena analýza konkrétního shluku. Podobně byly analyzovány i ostatní shluky. V dalším kroku je možné analyzovat všechny výsledky najednou (každý shluk má jinou váhu v souladu s počtem prvků). Průměrné hodnoty nákladů na zpracování odpadu pro rok 2025 za daných okrajových podmínek (viz výpočet *NERUDA* výše) jsou uvedeny v mapě na obr. 66.



Obr. 66: Průměrné náklady na zpracování SKO pro ORP v ČR

Z obr. 66 jsou patrné nejvyšší náklady v Moravskoslezském, Olomouckém a Zlínském kraji. Tento výsledek je dán omezenými kapacitami (nízká kapacita vzhledem k produkci odpadu) v těchto lokalitách. Důležitým výsledkem není jen informace o průměrné ceně, ale také i o její variabilitě. Směrodatná odchylka ceny za zpracování odpadu je zobrazena v mapě na obr. 67.



Obr. 67: Směrodatná odchylka nákladů na zpracování SKO pro ORP v ČR

Z obr. 67 se ukazuje, že největší proměnlivost nákladů na zpracování odpadu je v kraji Vysočina. Naopak příhraničí s Německem vykazuje variabilitu zanedbatelnou. To je dáno potenciálním exportem odpadu do Německa. Ve výpočtu *NERUDA* (viz výše) se pro Německo uvažovala konstantní cena za zpracování v roce 2025 pro všechny simulace. Celé výsledky této kapitoly vycházejí z uvažovaných okrajových podmínek výpočtů nástroje *NERUDA* v kap. 7.4.

8. Další vývoj výpočetních nástrojů

Vývoj výpočtového nástroje *NERUDA* probíhá od roku 2012. Během vývoje proběhla celá řada modifikací pro větší uplatnění nástroje z kvalitativního a časového hlediska. Modifikace se dále týkala aktuálních témat, která se řešila na pracovišti ÚPEI. Některé další body jsou v současnosti vyvíjeny v rámci bakalářských, diplomových a disertačních prací v rámci ÚPEI nebo spřátelených pracovišť (např. Ústav matematiky, FSI VUT). Několik aktuálně řešených bodů vypadá následovně.

Více typů odpadů

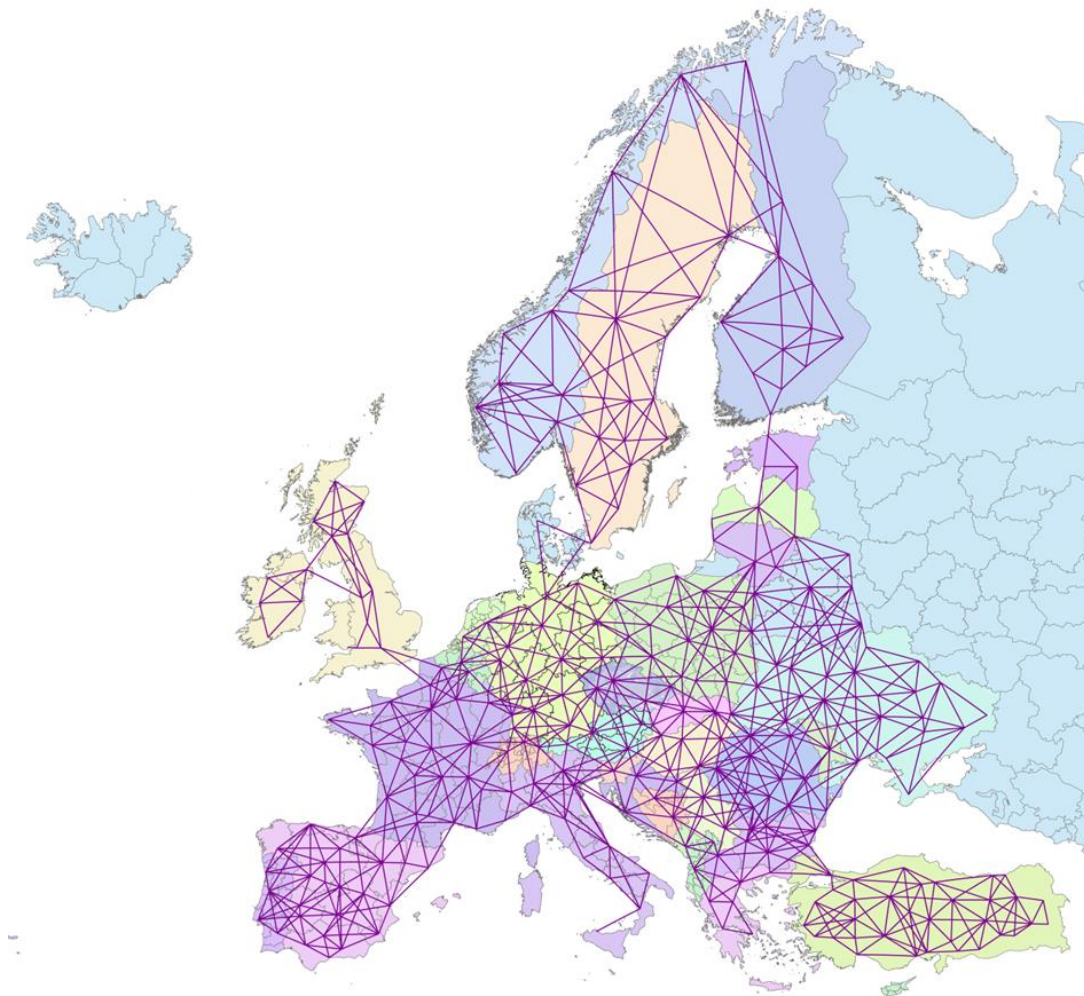
Problematika rozdílných původců odpadu souvisí s různorodostí cen za zpracování odpadu. Odpad z domácností je smluvně vázán na mnoho let za pevně daných podmínek. Oproti tomu živnostenský odpad je mnohdy obchodován na výrazně kratší časové bázi s proměnnou cenou podle aktuálních podmínek na trhu. Možné rozšíření stávajícího výpočtového systému je umožnit různé poplatky za zpracování podle typu odpadu. Tento bod zatím není v žádné fázi vývoje.

Posloupný výpočet

Pro úspěšný projekt EVO je významné časové hledisko realizace. Jak již bylo zmíněno, v roce 2024 je ukotven v legislativě zákaz skládkování neupravených KO v ČR. Případné dohody mezi producenty a zpracovateli budou tímto datem ovlivněny. Smluvní kontrakty se dají předpokládat řadově 10 – 15 let. To výrazně omezuje projekty s pozdější realizací, protože mnoho odpadu již nebude k dispozici. Tuto skutečnost lze simulovat posloupným výpočtem, kdy výsledky předchozího časového období jsou vstupem pro následující období. Jedná se převážně o kapacitní řešení realizovaných projektů a smluvní vztahy producentů s provozovateli zařízení. Tímto bodem se zabývá diplomová práce [80], plánované dokončení je v roce 2016.

NERUDA EU

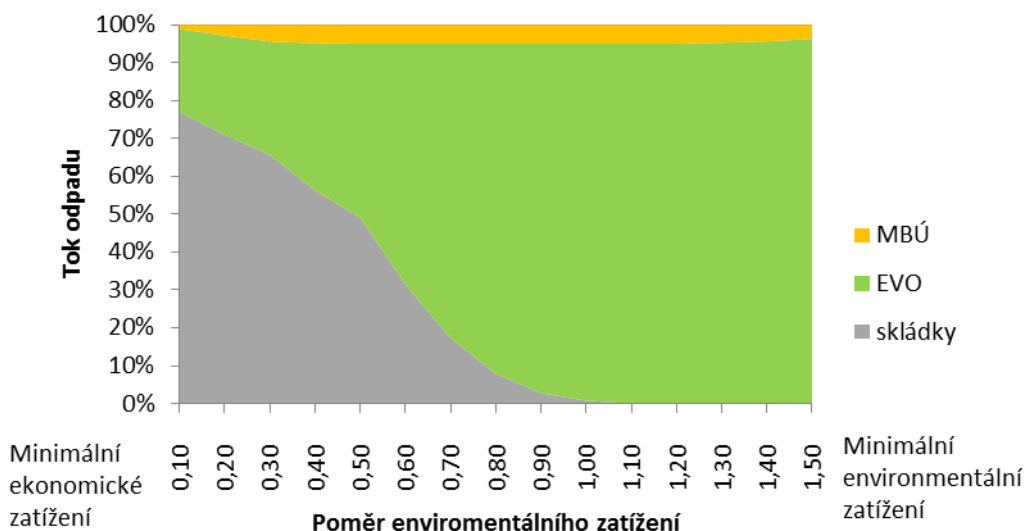
Rozšířením aktuální úlohy zaměřené na oblast EU se zabývala bakalářská práce [81] a diplomová práce [82], obě práce byly dokončeny v roce 2015. Tento bod umožní uchopit hlavní trendy v OH v rámci států EU. Jedná se např. o dopad výstavby kapacit ve Velké Británii na export odpadu do vyspělých zemí Evropy s následnou vazbou na cenu za zpracování v důsledku nadkapacit. Dalším motivem je výhled zemí, kde v současnosti převládá nakládání s odpady na nízkém stupni hierarchie (předpoklad budoucího odklonu od skládkování). Existující územní rozdělení s dopravní infrastrukturou je uvedeno na obr. 68.



Obr. 68: podkladová mapa pro výpočet NERUDA EU

Implementace dopadů na životní prostředí

Prvotním výpočtem s vícekritériální účelovou funkcí (ekonomický a environmentální faktor) v nástroji *NERUDA* se zabývala diplomová práce [83] z roku 2014. V práci byly použity základní odhady ekologických dopadů z provozu zařízení EVO, MBÚ a skládky. Pro reálnější výstupy je třeba zpřesnit použité odhady a obohatit je o různá technologická řešení. Ukázka prvotního výpočtu je zobrazena na obr. 69. Osa y udává množství odpadu, které zpracovávají jednotlivé uvažované technologie. Osa x (nezávislá proměnná) reflektuje váhu mezi ekonomickými a environmentálními dopady. V případě, že x je rovno 1, je brána stejná váha pro oba faktory (v případě 0,1 je ekonomický faktor 10 krát významnější).



Obr. 69: Tok SKO dle zpracování v závislosti na významu environmentálního dopadu [83]

Zpětný odvoz strusky

V současnosti se struska (zbytek po spálení odpadu) používá na rekultivaci, případně pro budování interních cest v rámci skládek. V případě omezení skládkování a navýšení spalování odpadu (vyšší množství strusky) může být uplatnění strusky finančně náročnější. To může mít lokální charakter z pohledu parametrů skládek v konkrétních regionech. Proto je vhodné uvažovat o rozšíření výpočtů nástroje *NERUDA* o zpětný odvoz strusky. Tento bod zatím není v žádné fázi vývoje.

Tvorba svazků pro jednotlivé regiony

V reálném životě je často OH řešeno formou svazků více samostatných oblastí. To lze nalézt v hojně míře např. v Rakousku. Svazek je velký partner pro zpracovatele odpadu a tudíž má možnost lépe domlouvat smluvní podmínky. Problémem svazků může být zhoršení situace některým členům z důvodu celkových podmínek pro celý svazek. To si žádá následné přerozdělení ušetřených peněz mezi zúčastněné obce. V nástroji *NERUDA* je pro tuto simulaci nutná modifikace vstupních dat a částečná úprava kódu. Model je třeba vždy upravit pro konkrétní požadavky na výpočet. Tato problematika je zatím ve fázi rozpracovanosti bez reálného výpočtu. Druhým nutným krokem je přerozdělení ušetřených peněz, kde je možné použít přístup založený na teorii her. Kdy je možné identifikovat potenciální ztrátu (resp. zisk)

pro jednotlivé obce v rámci jednoho svazku. Tímto bodem se zabývá diplomová práce [84], která by měla být obhájena v roce 2016.

NERUDA street

Tento bod je zaměřen na detailnější svoz v rámci ORP nebo většího města. Jedná se o zcela jiný výpočetní princip založený na přístupu RP (routing problem) nebo VRP (vehicle routing problem). Rozšířením úlohy je možné hledat ideální lokace pro stěžejní dopravní uzly (depo, překládací stanice atd.). Úvodní matematický model v rámci balíčku nástroje *NERUDA* byl sestaven v diplomové práci [85]. Na ní navazuje další práce [86], její dokončení je plánované na rok 2016. Stěžejním problémem takovýchto úloh je výpočetní náročnost. V případě reálné úlohy (tisíce hran) je v současnosti výpočetní čas extrémně vysoký. Cílem aktuálních prací je separace současné velké úlohy na více menších za existujícího propojení.

Další body budou řešeny s ohledem na priority pracovních aktivit pracoviště UPEI, převážně souvisejících se sekci *Energetických systému a simulačních výpočtů*.

9. Závěr a návrh dalšího postupu

Práce popsala aktuální situaci OH v EU se zaměřením na ČR. Z čehož vyplynula nutnost komplexního přístupu k plánování v této oblasti.

V prvním kroku bylo nutné sestavit kvalitní datovou základnu z pohledu celkového zpracovatelského řetězce, který zahrnuje produkci odpadu, jeho transport (dopravní infrastrukturu a náklady na přepravu) a konečné zpracování. Dále je třeba uvažovat legislativní podmínky v předmětné oblasti. Pro zpracování odpadu byly uvažovány tři technologie – zařízení EVO, zařízení MBÚ a skládky. U zařízení EVO jsou důležité informace o množství a ceně uplatnitelného tepla. Pro zařízení MBÚ se jedná o podmínky uplatnění LF a odstranění TF. U skládek je klíčovým faktorem výše skládkovacího poplatku.

Pro optimální návrh parametrů zařízení EVO v konkrétní lokalitě byl vytvořen matematický model popsáný v kap. 3. Hlavní neznámou byla identifikována cena na bráně, kterou akceptují producenti odpadu. Proto byl vytvořen nový nástroj *NERUDA*, který umožňuje simulovat konkurenční boj o odpad (viz kap. 4). Pomocí tohoto nástroje bylo analyzováno mnoho situací z více úhlů pohledů (analýzy zaměřené na investora, zaměřené na státní správu). Jednotlivé případové studie jsou uvedeny v kap. 7.1 až 7.4.

V další fázi bylo nutné analyzovat dopady na producenty. Nástroj *NERUDA* neposkytuje informace o konečném místě zpracování konkrétních odpadů, proto bylo nutné vyvinout nový výpočtový model. Ten dostal název *PIGEON* (viz kap. 5). Díky němu je možné identifikovat konečné místo zpracování konkrétního odpadu. Jeho velkou nevýhodou je značná časová náročnost oproti nástroji *NERUDA*, což limituje jeho použití. Z tohoto důvodu byly využity metody pro zpracování vícerozměrných statistických dat. Konkrétně byla použita shluková analýza, která umožnila zpracování menší sady dat vzniklých výpočtem v nástroji *NERUDA* pomocí nástroje *PIGEON* (viz kap 6).

V kap. 7.5 je zpracována případová studie založená na použití nástrojů *NERUDA*, *PIGEON* a metody shlukové analýzy. Ve studii je analyzován ekonomický dopad na producenty odpadu v případě různě se měnících podmínek v OH.

Představené nástroje jsou otevřené výpočtové modely, které je možné modifikovat v závislosti na konkrétní povaze výstupů výpočtů. Vzniklé nástroje jsou kontinuálně doplňovány o další funkcionality v rámci činností na pracovišti UPI v sekci *Energetických systému a výpočetních simulací*. Některé aktuální okruhy témat spojené s touto činností jsou uvedeny v kap. 8.

Literatura

- [1] Eurostat (2012) Key Indicators on EU Policy - Structural indicators - environment - municipal waste (generated, landfilled and incinerated). <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>. Accessed 22 November 2013
- [2] CEWEP – Confederation of European Waste-to-Energy Plants (2013) Energising waste - a win-win situation. http://www.cewep.eu/information/publicationsandstudies/statements/ceweppublications/m_1181. Accessed 14 November 2013
- [3] Velis CA, Brunner PH (2013) Recycling and resource efficiency: it is time for a change from quantity to quality. *Waste Manag Res* 31:539–540
- [4] BiPRO (2012) Screening of waste management performance of EU Member States. European Commission, Brussels
- [5] European Commission (2012) Use of economic instruments and waste management performances – final report. http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/final_report_10042012.pdf. Accessed 27 November 2013
- [6] Van de Wiel H (2010) Incineration tax unpopular with European Industry. Reward good behaviour, punish bad behaviour. http://www.wastematters.eu/uploads/media/Incineration_tax_unpopular_with_European_waste_industry.pdf. Accessed 2 December 2013
- [7] Eunomia Research and Consulting (2013) Residual waste infrastructure review - high-level analysis - issue 5. Eunomia, Bristol
- [8] Dehoust G, Schüler D, Vogt R, Giegrich J (2010) Klimaschutzpotenziale der abfallwirtschaft: am beispiel von siedlungsabfällen und altholz. Öko-Inst. eV, Berlin
- [9] Grosso M, Motta A, Rigamonti L (2010) Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Manage* 30:1238–1243
- [10] Reimann DO (2012) CEWEP energy report III (Status 2007 - 2010) Results of specific data for energy, efficiency rates and coefficients, plant efficiency factors and NCV of 314 european waste-to-energy plants. http://www.cewep.eu/m_1069. Accessed 29 November 2013
- [11] Pavlas M, Touš M (2009) Efficient waste-to-energy system as a contribution to clean technologies. *Clean Technol Environ Policy* 11:19–29
- [12] Pavlas M, Touš M, Bébar L, Stehlík P (2010) Waste to energy: an evaluation of the environmental impact. *Appl Therm Eng* 30:2326–2332
- [13] Department for Environment, Food & Rural Affairs (2013) Mechanical biological treatment of municipal solid waste. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/221039/pb13890-treatment-solid-waste.pdf. Accessed 12 Oct 2013
- [14] Consonni S, Giugliano M, Grosso M (2005) Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part B: emission and cost estimates. *Waste Manag* 25:137–148
- [15] Ma W, Hoffmann G, Schirmer M, Chen G, Rotter VS (2010) Chlorine characterization and thermal behavior in MSW and RDF. *J Hazard Mater* 178:489–498

- [16] Thiel S (2011) Mechanical-Biological Treatment (MBT) and incineration in a waste management system. RECUWATT Conference – Recycling and Energy 25 March 2011, Barcelona
- [17] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadu. Úřední věstník Evropské unie L 182, 1999.
- [18] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/12/ES ze dne 5. dubna 2006 o odpadech. Úřední věstník Evropské unie L 114, 2006
- [19] Novela zákona o odpadech s číslem 229/2014 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů.
- [20] Pavlas M., Mareš M., Ucekaj V., Oral J., Stehlik P., Optimální nastavení výše podpory výroby elektřiny z odpadů ve vztahu k ceně elektřiny pro spotřebitele, EVECŮ Brno a Vysoké učení technické v Brně, Závěrečná zpráva projektu EFEKT 2011, vydalo Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha, 2012.
- [21] Panos M., Pardalos, Mauricio G. C., Handbook of Applied Optimization, Oxford University Press, USA, ISBN 978-0-19-512594-8, 2002.
- [22] Birge J. R., Louveaux F., Introduction To Stochastic Programming, Springer Verlag, 1997.
- [23] Šomplák, R., Využití metod stochastického programování pro hodnocení investic v energetických zdrojích. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 68 s. 2011.
- [24] Black, Fischer, Michael C., Jensen, Scholes M., The Capital Asset Pricing Model, Some Empirical Tests, in M. Jensen ed., Studies in the Theory of Capital Markets. New York: Praeger Publishers, pp. 79–121, 1972.
- [25] Damodaran A., online ekonomická data ze dne 22. Dubna 2014, <http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>
- [26] Birge J.,R., Louveaux F., Introduction to stochastic programming, 2nd ed, Springer, New York, USA, 2011.
- [27] Šomplák R., Ferdan T., Pavlas M., Popela P., Waste-to-energy facility planning under uncertain circumstances, Applied Thermal Engineering, 61, 106-114, 2013, ISSN 1359-4311.
- [28] Ferdan T., Šomplák R., Pavlas M., Improved feasibility analysis under volatile conditions: case of waste-to-energy, Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014, 2014, 691-696.
- [29] International Solid Waste Association, Waste-to-Energy State of the Art Report, 6th Edition, 2012.
- [30] Janošák, F. Aplikace optimalizace pro návrh subsystémů energetických celků. Bakaářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 23 s. 2014.
- [31] Procházka V., Matematický model dopravní úlohy pro oblast odpadového hospodářství. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 43 s. 2012.
- [32] Atlas zařízení pro nakládání s odpady“, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2010.
- [33] Timko, D., Kapacitní možnosti ČEZ ve spalování TAP, Sborník referátů, Odpady 21, Ostrava, 15-16. 5. 2012.
- [34] Ucekaj V., Pavlas M., Šarlej M., Negativní dopady spalování lehké frakce na ovzduší. Odpady, p. 10 – 13, ISSN 1210-4922, 2012.

- [35] Thomé-Kozmiensky K.J. Strategie Planung Umweltrecht. Band 8, Leden 2014
- [36] Ministerstvo životního prostředí, Matematické vyjádření soustavy indikátorů odpadového hospodářství - aktualizace 10. 9. 2013, dostupné z http://www.mzp.cz/cz/matematicke_vyjadreni.
- [37] Gregor, J. Komplexní přístup k modelování dopravních nákladů při energetickém využití odpadů. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 83 s. 2014.
- [38] Young D., Hawkins T., Ingwersen W., Smith R., Designing sustainable supply chains, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 253 – 258, 2012.
- [39] Kettle K. H., Eder M., Narodoslawsky M., Niemetz N., RegiOpt Conceptual Planner - Identifying possible energy network solutions for regions, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 517 – 522, 2012.
- [40] Süle Z., Bertók B., Friedler F., Fan L.T., Optimal Design of Supply Chains by P-graph. Framework Regarding Uncertainties of Utilizing Renewable Raw Materials, *Chemical Engineering Transactions*, 25, pp. 453-458, 2011.
- [41] Varbanov P. S., Klemeš J. J., Kravanja Z., Čuček L., Reducing the dimensionality of criteria in multi-objective optimisation of biomass energy supply-chains, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1231 – 1236, 2012.
- [42] Ghiani G., Laporte G., Musmanno R., Introduction to Logistics Systems Planning and Control, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2004.
- [43] Williams, Paul H., 2009, Logic and integer programming. Springer, London, UK.
- [44] Chian-Son Yu, Han-Lin Li. A robust optimization model for stochastic logistic problems. *Int. J. Production Economics* 64 (2000), p. 385-397, [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00074-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00074-2).
- [45] Juul, N. Münster, M. Ravn, H. Ljunggren Söderman M. Challenges when performing economic optimization of waste treatment: A review. *Waste Management* 33 (2013), p. 1918 - 1925, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.015>.
- [46] Münster, M. Meibom, P. Optimization of use of waste in the future energy system. *Energy* 36 (2011), p. 1612 - 1622, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.070>.
- [47] Ferri, G. L. Chaves, G. de L. Ribeiro, G. M. Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement. *Waste Management* 40 (2015), p. 173 - 191, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.036>.
- [48] Tito Homem-de-Melloa, Güzin Bayraksan. Monte Carlo sampling-based methods for stochastic optimization. *Surveys in Operations Research and Management Science* 19 (2014), p. 56 - 85, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sorms.2014.05.001>.
- [49] Fan, Y.R. Huang, G.H. Yang, A.L.. Generalized fuzzy linear programming for decision making under uncertainty: Feasibility of fuzzy solutions and solving approach. *Information Sciences* 241 (2013), p. 12 - 27, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2013.04.004>.
- [50] Xu, Y. Huang, G.H. Qin, X.S. Cao, M.F. Sun, Y. An interval-parameter stochastic robust optimization model for supporting municipal solid waste management under uncertainty. *Waste Management* 30 (2010), P. 316 - 327, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.006>.
- [51] Nevrlý, V. Matematické modely v logistice. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 41 s. 2014.

- [52] Rychtář, A. Optimalizace toků v sítích. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 32 s. 2014.
- [53] Ehrgott, M. Multicriteria optimization. Springer Science & Business Media, 2006. 323 s. ISBN 3540-276599.
- [54] Taghdisian, H. Pishvaie, M. R. Farhadi, F. Multi-objective optimization approach for green design of methanol plant based on CO₂-efficiency indicator. *Journal of Cleaner Production* (2014) 1-11 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.032>.
- [55] Kasperski, A. Zielinski, P. Combinatorial optimization problems with uncertain costs and the OWA criterion. *Theoretical Computer Science* 565 (2015), p. 102 - 112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2014.11.013>.
- [56] Chassein, A. Goerigk, M. Alternative formulations for the ordered weighted averaging objective. *Information Processing Letters* 115 (2015), p. 604 - 608, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ipl.2015.02.008>.
- [57] Ehrgott, M. Ide, J. Schöbel, A. Minmax robustness for multi-objective optimization problems. *European Journal of Operational Research* 239 (2014), p. 17 - 31, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.013>.
- [58] Mandelli, D. Yilmaz, A. Aldemir, T. Metzroth, K. Denning, R. Scenario clustering and dynamic probabilistic risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety* 115 (2013), p. 146 - 160, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2013.02.013>.
- [59] Feng, Y. Ryan, S. M. Scenario construction and reduction applied to stochastic power generation expansion planning. *Computers and Operations Research* 40 (2013), p. 9 - 23, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2012.05.005>.
- [60] Zukui Lia, Christodoulos A. Floudasb. Optimal scenario reduction framework based on distance of uncertainty distribution and output performance: I. Single reduction via mixed integer linear optimization. *Computers and Chemical Engineering* 70 (2014), p. 50 - 66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.03.019>.
- [61] Bidart Ch., Fröhling M., Schultmann F., Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives, *Applied Thermal Engineering*, 51 (2013), 1107-1115, ISSN 1359-4311.
- [62] Beccali G., Cellura M., Mistretta M., Managing Municipal Solid Waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 6 (2001), 243-249.
- [63] Kočí V., Trečáková T. . Mixed municipal waste management in the Czech Republic from the point of view of the LCA method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 16 (2011), 113-124.
- [64] Ghiani G. et al., Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers & Operations Research*, 44(2014), 22-32.
- [65] Kravanja Z., Čuček L., Multi-Objective Optimisation for Generating Sustainable Solutions Considering Total Effects on the Environment, *Applied Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 101 (2013).
- [66] Smith, Raymond L., and Gerardo J. Ruiz-Mercado. "A Method for Decision Making Using Sustainability Indicators." *Clean Technologies and Environmental Policy* 16, no. 4 (April 1, 2014): 749-55. doi:10.1007/s10098-013-0684-5.
- [67] Pelloni L., Development of Waste-to-Energy Projects, *Waste Management Volume 3, Recycling and Recovery*, TK Verlag Karl. J. Thomé-Kozmiensky, Nietwerder-Neuruppin, Germany, 2012.
- [68] Rand T., Haukohl J., Marxen U. Municipal Solid Waste Incineration: Requirements for a Successful Project, The World Bank, Washington, D.C., 2000.

- [69] Themelis N. J., Barriga M. E. D., Estevez P., Velasco M. G., Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean, Inter-American Development Bank, 2013.
- [70] Song J., Song D., Zhang X., Sun Y., Risk Identification for PPP Waste-to-Energy Incineration Projects in China, *Energy Policy*, 61 (2013).
- [71] Geddes R., Valuation & Investment Appraisal, Canterbury: Financial World Publishing, 2002, ISBN 08-529-7634-8.
- [72] Pereira E. J. da S., Pinho J. T., Galhardo M. A. B., Macêdo N., Methodology of Risk Analysis by Monte Carlo Method Applied to Power Generation with Renewable Energy, *Renewable Energy*, 69 (2014).
- [73] Li C-b., Lu G-s., Wu S., The Investment Risk Analysis of Wind Power Project in China, *Renewable Energy*, 50 (2013), 481–487.
- [74] Ferdan T., Šomplák R., Pavlas M., Improved feasibility analysis under volatile conditions: case of waste-to-energy, *Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014*, 2014, 691-696.
- [75] Šomplák R., Pavlas M., Ucekaj V., Popela P., Waste-to-Energy Facility Planning Supported by Stochastic Programming - Part I Introduction, *Chem. Eng. Trans.*, 29, 649–654, 2012.
- [76] Šomplák R., Pavlas M., Kropáč J., Putna O., Procházka V., Logistic Model Based Tool for Policy-Making towards Sustainable Waste Management, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2014.
- [77] European Parliament and the Council, Directive 2010/75/EC on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), *Off. J. Eur. Communities* 22 (2010), L334: 17–50, <epp.eurostat.ec.europa.eu> accessed 22. 1. 2012.
- [78] Šomplák R., Touš M., Ferdan T., Pavlas M., Popela P., Waste-to-Energy Facility Planning Supported by Stochastic Programming – Part II Introduction, *Chem. Eng. Trans.*, 29, 739–744, 2012.
- [79] Ucekaj, V. Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 153 s. 2010.
- [80] Rychtář, A. Transformace optimalizačních modelů s aplikacemi. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [81] Guštara, D. Energetické využití odpadů jako klíčový prvek moderních systémů odpadového hospodářství. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 44 s. 2015.
- [82] Gal, Pavel. Identifikace podobných řešení při stochastické simulaci v oblasti odpadového hospodářství. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 87 s. 2015.
- [83] Bravený, A. Udržitelnost systémů odpadového hospodářství. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 54 s. 2014.
- [84] Osička, O. Využití teorie her v odpadovém hospodářství. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016.

- [85] Procházka, V. Advanced Optimization Models in Waste Management. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 64 p. 2014.
- [86] Nevrlý, V. Modely a metody pro svozové úlohy, Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016.

Seznam použitých symbolů a zkratek

BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
C	zpracovatelská kapacita
CAMP	ukazatel oceňování kapitálových aktiv
CF	peněžní tok
CZT	centrální zásobování teplem
ČR	Česká republika
EP	energetický průmysl
EVO	energetické využití odpadu
EU	Evropská unie
exp	exponent
HN	přístup “here and now”
i	úroková míra
I	investiční náklady
IRR	vnitřní výnosové procento
ISWA	International Solid Waste Association
LF	lehká frakce
LHV	výhřevnost
KOT	kondenzační odběrová turbína
MBÚ	mechanicko-biologická úprava
NPV	čistá současná hodnota
OH	odpadové hospodářství
ORP	obec s rozšířenou působností
PBP	doba návratnosti investice
PREKL	překládací stanice
PT	protitlaká turbína
R_c	rizikovost země
R_f	bezriziková investice
R_m	očekávaný výnos
R_o	ostatní rizika
SCZT	scénáře pro vývoj poptávek po teple
SKL	skládka
SKO	směsný komunální odpad

SLIS	slisovaný směsný komunální odpad
SML	přímka trhu cenných papírů
TAP	tuhé alternativní palivo
TF	těžká frakce
T-E model	technicko-ekonomický model
ÚPEI	Ústav procesního a ekologického inženýrství
VUT v Brně	Vysoké učení technické v Brně
WACC	vážený průměr nákladů na kapitál
WAF	faktor dostupnosti odpadu
WPM	metoda vážených produktů
WS	přístup “wait and see”
WSM	metody vážených součtů
x	rozhodnutí v prvním stupni dvoustupňového stochastického programování
y	rozhodnutí v druhém stupni dvoustupňového stochastického programování
ZEVO	zařízení na energetické využití odpadu
ZLF	zpracování lehké frakce
β	koeficient rizikovosti oboru
ξ	neurčité parametry v optimalizačních úlohách

Pozn.: určité parametry a proměnné použité v matematických modelech v kap. 3 až 5 jsou uvedeny přímo v textu u použitých rovnic, nerovnic a funkcí. Z důvodu přehlednosti nejsou znovu citovány v seznamu použitých symbolů a zkratk.