



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# POKROČILÉ SÍŤOVÉ MODELY V OBLASTI OBĚHOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

ADVANCED NETWORKFLOW MODELS FOR CIRCULAR ECONOMY

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jaroslav Pluskal

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

BRNO 2023



## **ABSTRAKT**

Dizertační práce na téma "Pokročilé síťové modely v oblasti oběhového hospodářství" se zabývá zásadním tématem v souvislosti s potřebou efektivního nakládání s odpady z environmentálního hlediska a splněním přísných legislativních cílů. Oběhové hospodářství je komplexním řetězcem, který zahrnuje několik fází, od sběru odpadu, jeho třídění až po recyklaci a konečnou likvidaci. Tento komplexní proces představuje výzvu při analýze a optimalizaci, zejména vzhledem k různým aktérům a proměnným. Proto je nezbytný vývoj podpůrných nástrojů a modelů, které umožní provádět detailní analýzy a poskytnou patřičný vhled do řešené problematiky. V rámci této práce je představena sada nových matematických modelů, které s využitím optimalizačních algoritmů umožňují plánovat potřebnou infrastrukturu pro zpracování odpadu a také pracovat s vykazovanými daty tak, aby bylo dosaženo efektivního a udržitelného řešení pro oběhové hospodářství. Přínos těchto modelů je dále demonstrován na řešení konkrétních případových studií, které ukazují jejich schopnost optimalizovat procesy v rámci oběhového hospodářství. Tyto případové studie potvrzují, že úlohy založené na problému toku v síti mají potenciál významně přispět k plánování v oblasti odpadového hospodářství a pomoci tak při přechodu na cirkulární ekonomiku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Odpadové hospodářství, Matematické programování, Optimalizace, Tokové síťové modely

## **ABSTRACT**

The dissertation thesis on "Advanced Network Models in the Field of Circular Economy" addresses a crucial topic concerning the need for efficient waste management from an environmental perspective and the achievement of stringent legislative goals. Circular economy represents a complex chain of processes, including waste collection, sorting, recycling, and final disposal. Analyzing and optimizing this intricate process pose challenges, particularly due to various stakeholders and variables involved. Hence, the development of supportive tools and models is imperative to conduct detailed analyses and gain insight into the addressed issues. This work introduces a set of novel mathematical models, utilizing optimization algorithms to plan the necessary infrastructure for waste processing and effectively work with reported data, aiming for sustainable solutions within the circular economy framework. The contributions of these models are further demonstrated through specific case studies, showcasing their ability to optimize processes within the circular economy. These case studies confirm that network flow-based tasks have the potential to significantly contribute to waste management planning, facilitating the transition towards a circular economy.

## **KEYWORDS**

Waste management, Mathematical programming, Optimization, Network flow models

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat svému školiteli doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. a školiteli specialistovi Ing. Radovanu Šomplákovi, Ph.D. za odborné vedení závěrečné práce, podnětné rady a poskytnutí kvalitních podmínek pro studium. Dále děkuji Ing. Vlastimíru Nevrlému, Ph.D. a Ing. Veronice Smejkalové, Ph.D. za spolupráci při vývoji inovativních přístupů a konzultaci dílčích problémů.

Tato práce vznikla za podpory projektů:

"Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie"  
reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008413 financovaného z EFRR.

"Laboratoř integrace procesů pro trvalou udržitelnost (SPIL)"  
reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_003/0000456 financovaného z EFRR.

„Prognózování produkce odpadů a stanovení složení komunálního odpadu”  
TIRSMZP719 financovaného z TAČR.

„Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost“ CEVOOH, reg. č. SS02030008 financovaného z TAČR.

„Pokročilé metody operačního výzkumu pro optimální rozhodování v odpadovém hospodářství“, reg. č. 22-11867S financovaného z GAČR.

„Implementace moderních přístupů při navrhování procesů a zařízení v procesním a energetickém průmyslu“, reg. č. FSI-S-20-6342.

„Integrace procesů pro trvalou udržitelnost“, reg. č. FSI-S-23-8173.

„Analýza složení a vlastností odpadů s ohledem na energetické využití“, reg. č. FCH/FSI-J-21-7410.

„Strategické plánování infrastruktury pro dotřídění plastů: Implementace moderních automatizovaných center do současného řetězce“, reg. č. FV22-14.

## OBSAH

1	ÚVOD.....	9
1.1	ČINNOSTI NA ÚPI A VÝZVY V OBLASTI OPTIMALIZACE OH .....	10
1.2	KONCEPCE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	13
2	LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	14
2.1	ANALÝZA MONITOROVANÝCH DAT .....	14
2.2	PŘECHOD NA CIRKULÁRNÍ EKONOMIKU .....	16
2.3	VÝPOČTOVÁ NÁROČNOST .....	20
2.4	VÝZKUMNÁ MEZERA A ZAMĚŘENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	22
3	SPRÁVA DAT ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.....	24
3.1	ANALÝZA A REKONSTRUKCE DAT.....	25
3.1.1	Struktura dat OH.....	25
3.1.2	Pre-processing dat a oprava zjevných chyb .....	26
3.1.3	Vyrovnaní dat .....	27
3.1.4	Definice vah.....	30
3.2	ANALÝZA SLOŽENÍ TOKU ODPADU .....	32
3.2.1	Bodový odhad .....	33
3.2.2	Intervalový odhad .....	34
3.3	VYHODNOCENÍ APLIKACE NA PŘÍPADOVOU STUDII .....	36
3.4	SHRNUTÍ A DISKUZE.....	39
4	PODPORA PLÁNOVÁNÍ V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ.....	41
4.1	OBECNÝ MODEL .....	41
4.2	OPTIMALIZACE MÍRY SEPARACE.....	45
4.2.1	Matematický aparát.....	46
4.2.2	Případová studie.....	49
4.3	ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU.....	53
4.3.1	Matematický aparát.....	55
4.3.2	Případová studie.....	57
4.4	INFRASTRUKTURA PRO DOTŘÍDĚNÍ PLASTŮ .....	61
4.4.1	Matematický aparát.....	62
4.4.2	Případová studie.....	62
4.5	VYHODNOCENÍ DOSTATEČNOSTI KAPACIT.....	67
4.5.1	Matematický aparát.....	68
4.5.2	Případová studie.....	68
4.6	SHRNUTÍ A DISKUZE.....	76

5	VÝPOČTOVÁ NÁROČNOST .....	77
5.1	SHLUKOVÁNÍ – VARIABILNÍ DETAIL .....	77
5.1.1	Transformace souřadnic .....	78
5.1.2	Volba variabilního detailu.....	79
5.1.3	Více zájmových bodů.....	80
5.1.4	Reálná dopravní síť .....	80
5.1.5	Klíčové parametry .....	81
5.1.6	Variabilní detail mezi zájmovými subjekty .....	82
5.1.7	Aplikace na případovou studii .....	83
5.2	ODEBÍRÁNÍ HRAN .....	85
5.2.1	Popis přístupu.....	86
5.2.2	Ukázka řešení .....	88
5.3	SHRNUTÍ A DISKUZE .....	90
6	ZÁVĚR .....	92
7	PUBLIKAČNÍ ČINNOST.....	93
	REFERENCE .....	95

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Cíle balíčku oběhového hospodářství [A1].	9
Obr. 1.2: Návaznosti projektů řešených v rámci aktivit ÚPI na výstupy a jejich aplikace.	11
Obr. 1.3: Schéma popisující kombinaci zdrojů k definici cílů dizertační práce.	13
Obr. 2.1: Data týkající se účinnosti recyklace plastů včetně modelové funkce.	17
Obr. 2.2: Data týkající se účinnosti recyklace papíru včetně modelové funkce.	17
Obr. 3.1: Obecný rámec přístupu ke správě a vyhodnocení dat OH.	24
Obr. 3.2: Schéma popisující algoritmus opravy chybných toků.	26
Obr. 3.3: Schéma pro výpočet průměrné sušiny v uzlu.	33
Obr. 3.4: Analýza transportu kalů a identifikace hmotnostních nesouladů včetně oprav zjevných chyb v pre-processingu.	37
Obr. 3.5: Rozdělení kalů ve zvodnělé formě dle evidovaného podílu sušiny.	38
Obr. 3.6: Grafické znázornění výpočtu sušiny v kalech pro evidenty s konečným zpracováním.	38
Obr. 3.7: Porovnání přístupů pro materiálově využitou sušinu v jednotlivých krajích.	39
Obr. 3.8: Histogram procentuální odchylky materiálové využití v rámci ORP.	39
Obr. 4.1: Schéma uvažovaného systému pro vyhodnocení optimální míry separace a zpracovatelskou infrastrukturu.	45
Obr. 4.2: Schéma popisující toky odpadu pro materiálově využití.	46
Obr. 4.3: Ukázka váženého průměru vstupních toků pro definici účinnosti dotřídění.	46
Obr. 4.4: Schéma popisující iterační postup řešení úlohy.	47
Obr. 4.5: Závislost sledovaných kritérií na parametru lambda.	49
Obr. 4.6: Výsledná mapa toků plastu a rozmístění příslušných třídících linek.	50
Obr. 4.7: Výsledná mapa toků papíru a rozmístění příslušných třídících linek.	51
Obr. 4.8: Výsledná mapa toků SKO a rozmístění ZEVO.	52
Obr. 4.9: Modelem vypočítaný podíl separovaného a materiálově využitého odpadu.	53
Obr. 4.10: Klíčové prvky modelovaného systému při návrhu infrastruktury ZEVO.	54
Obr. 4.11: Příklad korekční funkce dvou různých zařízení ve stejné lokalitě.	54
Obr. 4.12: Schéma dvojstupňového matematického modelu pro návrh infrastruktury ZEVO.	56
Obr. 4.13: Výsledná infrastruktura ZEVO a odpovídající alokace odpadu v prvním scénáři.	59
Obr. 4.14: Diagram kotle pro navrhnuté ZEVO v Ústí nad Labem.	60
Obr. 4.15: Struktura zpracování plastového odpadu po integraci automatizovaných linek.	61
Obr. 4.16: Existující infrastruktura pro zpracování plastů a uvažované regiony pro automatizovaná třídící centra.	63
Obr. 4.17: Pareto optimální řešení pro infrastrukturu zpracování plastů.	64
Obr. 4.18: Počet automatizovaných center a náklady na úsporu emisí vzhledem k parametru lambda.	65
Obr. 4.19: Navrhnutá infrastruktura pro zpracování plastů včetně toků odpadu.	66
Obr. 4.20: Podíl jednotlivých složek v účelové funkci.	67
Obr. 4.21: Mapa toků NO alokovaného ke spalování.	71
Obr. 4.22: Srovnání vyhodnocení dostatečnosti kapacit spalování NO v různých scénářích.	72
Obr. 4.23: Mapa toků NO alokovaného k deemulzifikaci.	72
Obr. 4.24: Mapa toků NO alokovaného k biodegradaci.	73
Obr. 4.25: Mapa toků NO alokovaného ke stabilizaci.	74

Obr. 4.26: Srovnání vyhodnocení dostatečnosti kapacit stabilizace NO v různých scénářích.....	74
Obr. 4.27: Obecný rámec navrhovaného .....	75
Obr. 5.1: Ukázka principu transformace bodů.....	79
Obr. 5.2: Výsledné rozdělení obcí do shluků před a po zohlednění produkce odpadu.....	82
Obr. 5.3: Výsledná redukováná dopravní síť pro uvažovanou případovou studii.....	83
Obr. 5.4: Výsledné toky odpadu pro uvažovanou případovou studii na redukované síti. ....	84
Obr. 5.5: Detailní toky odpadu pro uvažovanou případovou studii na redukované síti. ....	85
Obr. 5.6: Schéma přístupu k řešení rozsáhlých úloh pomocí odstranění hran.....	86
Obr. 5.7: Výsledky klasifikace hran na testovacích datech.....	87
Obr. 5.8: Hustota rozdělení pravděpodobnosti optimality hran.....	89

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Přehled nejběžnějších typů odpadů a jejich výhřevnost.....	18
Tab. 4.1: Popis jednotlivých scénářů pro návrh optimální infrastruktury ZEVO.....	58
Tab. 4.2: Podíl jednotlivých složek na účelové funkci nalezeného řešení.....	60
Tab. 4.3: Porovnání parametrů modelů při různém nastavení scénářů.....	65
Tab. 4.4: Přehled definovaných toků nebezpečného odpadu a odpovídající produkce.....	69
Tab. 4.5: Parametry zbytkového odpadu u jednotlivých typů zpracování.....	69
Tab. 4.6: Přehled koeficientů pro zpracování v účelové funkci.....	70
Tab. 5.1: Porovnání dopadu různého detailu na parametry modelu a výsledky optimalizace.....	88
Tab. 5.2: Výsledky redukce modelu při odstranění hran na základě vzdálenosti.....	89
Tab. 5.3: Výsledky redukce modelu při odstranění hran na základě klasifikačního modelu.....	90

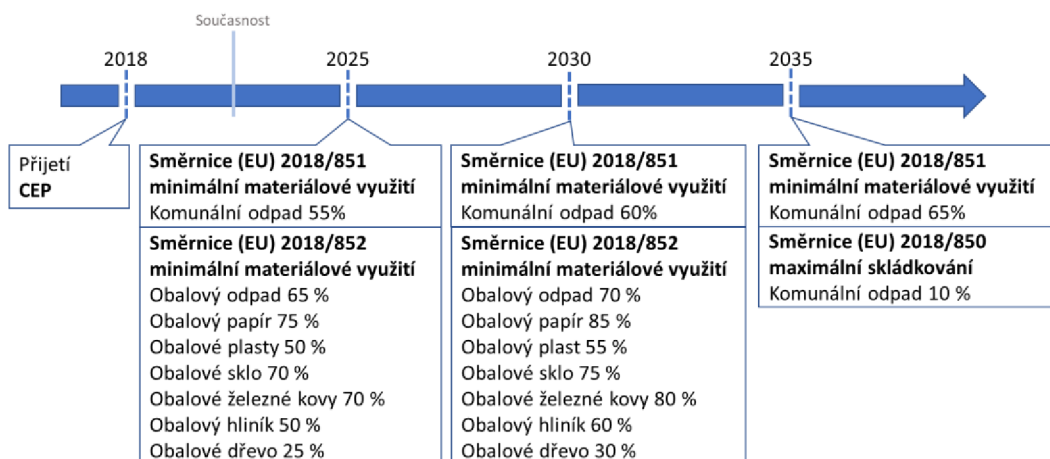
## SEZNAM ZKRATEK

ISOH	Informační systém odpadového hospodářství
KO	Komunální odpad
NO	Nebezpečný odpad
ObH	Oběhové hospodářství
OH	Odpadové hospodářství
ObjO	Objemný odpad
ORP	Obec s rozšířenou působností
PDISOH	Pracovní databáze ISOH
SKO	Směsný komunální odpad
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadu
ZÚJ	Základní územní jednotka



# 1 ÚVOD

Zvyšující se produkce odpadu po celém světě společně s jeho nevhodným nakládáním vzhledem k životnímu prostředí vytvořila v posledních letech z této oblasti stěžejní výzkumné téma [B1]. Cílem Evropské unie a dalších rozvinutých zemí je opustit lineární model odpadového hospodářství (OH) a přejít na koncept oběhového hospodářství (ObH) neboli cirkulární ekonomiky [B2]. Stěžejními opatřeními na základě hierarchie v oblasti OH jsou prevence odpadu, opětovné použití, recyklace a energetické využití [B3]. Strategická rozhodnutí týkající se komunálního odpadu (KO) a jeho zpracování hrají klíčovou roli v definovaném rámcovém plánu „Balíček oběhového hospodářství“ („Circular Economy Package“). Hlavním cílem je omezit skládkování KO [B4] a podporovat zvýšení míry třídění a recyklace [B5]. Dále jsou stanovené dílčí milníky pro materiálové využití u nejčastěji zastoupených složek separovaného odpadu [B6]. Tlak na zvýšení recyklace a snížení produkce odpadu nepřichází však pouze od vládních institucí, ale také od široké veřejnosti, která si je stále více vědoma negativních dopadů na životní prostředí a veřejné zdraví [B8]. Konkrétní cíle v nadcházejících letech včetně příslušných směrnic jsou znázorněny na Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Cíle balíčku oběhového hospodářství [A1].

Problematika nakládání s odpady má dvě protichůdné perspektivy. Jedna se soustředí převážně na environmentální dopad systému nakládání s odpady, zdůrazňuje význam maximálního třídění jako klíčového prvku pro materiálové využití. Druhý přístup je více ekonomicky motivovaný a zkoumá především celkové náklady na systém OH s cílem udržet cenu a rozsah služby pro občany na rozumné úrovni. Obě tyto perspektivy mají své výhody i nevýhody, a optimální řešení je třeba hledat mezi nimi. Jednotlivé pohledy na danou problematiku pak ovlivňují strategická rozhodnutí týkající se zpracovatelské infrastruktury. Současně je celý systém ovlivněn chováním samotných občanů, jejich sociálním statutem, vzděláním a dalšími faktory, přičemž dostupnost infrastruktury (například hustota rozmístění sběrných nádob) a propagace systému PAYT („Pay as You Throw“) společně s „Door-to-Door“ sběrem mohou významně podpořit sběr separovaných složek KO.

Většina populace, alespoň v zemích s vyspělým systémem nakládání s odpady, podporuje základní myšlenku podpory ekologie a konceptu cirkulární ekonomiky, přičemž třídění a recyklace odpadu je vnímána jako klíčový krok směrem k ochraně životního prostředí. Nicméně reálné provozy potvrzují, že při zpracování odpadu vznikají reziduální toky materiálu, které není možné materiálově zpracovat. Typickým příkladem je plastový odpad, u kterého je v průměru využíváno pouze 60 % z vytríděného odpadu [B7]. Globálně je stále

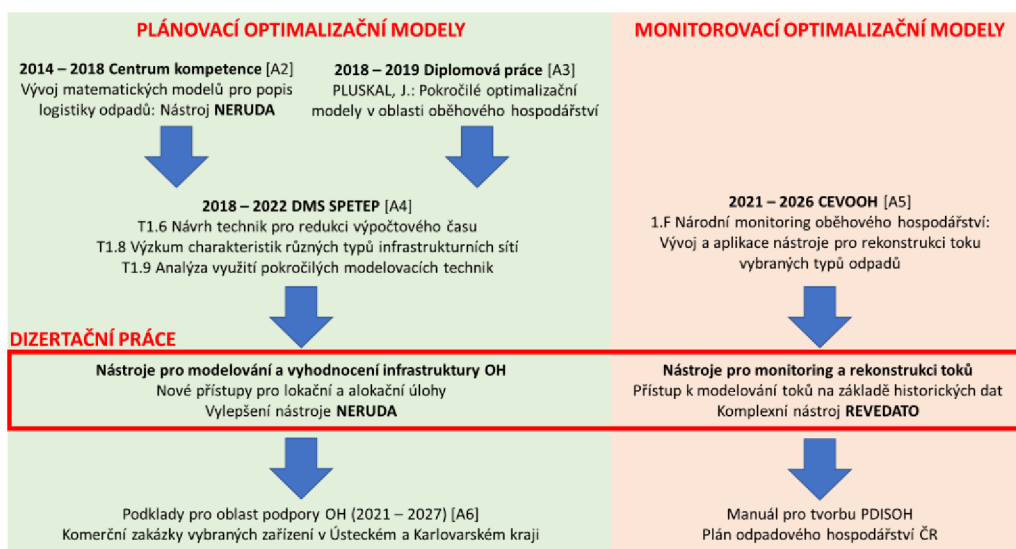
příliš mnoho odpadu, který je ukládán na skládky, a míra recyklace je nadále nedostatečná [B9]. Zpracovatelský řetězec pro recyklaci lze navíc považovat za ekonomicky nevýhodný vůči energetickému využití či skládkování [B10]. Zároveň jsou primární zdroje surovin často levnější než sekundární [B11]. V důsledku toho vzniká rozdíl mezi množstvím tříděného odpadu (shromážděným od občanů) a množstvím skutečně recyklovaným. Často jsou tak materiálově využity pouze některé frakce odpadu a vznikají zbytkové toky odpadu, které zvyšují náklady na celý systém a jsou ve výsledku často skládkovány.

Pro splnění výše uvedených směrnic a zajištění udržitelného systému nakládání s odpady bude nutné budovat novou infrastrukturu pro zpracování odpadu včetně plánování logistického řetězce. S ohledem na řadu faktorů ovlivňujících systém OH a rozsah řešení problematiky v kontextu celé ČR, není možné realizovat efektivní investice bez podpůrných nástrojů, které mohou poskytnout patřičný vhled do simulovaného systému. Za tímto účelem jsou vyvíjeny optimalizační modely, které umožňují dosáhnout nejlepšího výsledku při strategickém plánování. Nicméně je široce uznáváno, že optimalizace reálných úloh představuje velmi složitý a komplexní problém, často s kombinatorickou náročností jako je problém obchodního cestujícího, problém trasování vozidel nebo, jak je to v případě lokace zařízení a alokaci odpadu, problém toku v síti [B12]. Přínos podpůrných nástrojů založených na matematickém programování je v rámci výzkumných i reálných aplikací zřejmý a jejich další vývoj může přispět k rychlejšímu a efektivnějšímu přechodu na ObH.

## 1.1 Činnosti na ÚPI a výzvy v oblasti optimalizace OH

Ústav procesního inženýrství lze rozdělit do několika odborných sekcí, jejichž činnosti jsou různě provázány a umožňují tak řešení komplexních projektů. V rámci sekce „Energetické systémy a simulační výpočty“ je kladen důraz zejména na výpočetní a simulační nástroje, které umožňují efektivně vyhodnocovat různé dílčí systémy. Jedním z hlavních témat je plánování v oblasti OH se zaměřením na optimální integraci jednotek pro termické využití odpadu, správu dat z monitoringu, prognózy produkce a optimalizaci logistiky. S ohledem na komplexnost této oblasti a nárůstem digitalizace je nutné vyvíjet pokročilé nástroje, které umožní efektivně simulovat a optimalizovat vyhodnocovaný systém. Současně se také zvyšují požadavky na detail řešených studií a velikost dodavatelského řetězce, kde se jednotlivé subjekty mohou vzájemně ovlivňovat. Potřeba disponovat podobnými nástroji je dána i podpořením vybraných projektů či poptávkou od komerčních partnerů. Vyvíjené modely v rámci činnosti na ÚPI tak mají praktický přesah a veškeré modelované prvky či systémy vycházejí z přirozeného vývoje. Obr. 1.2 popisuje časovou osu jednotlivých projektů s návazností na odpovídající nástroje.

Matematické modely pro řešení logistiky odpadu byly na ÚPI řešeny již v rámci projektu „Centrum kompetence pro energetické využití odpadu“ [A2]. Ovšem z pohledu praktických aplikací stále narůstaly požadavky na modelovaný systém. V roce 2018 byl podpořen projekt „Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie“ (SPETEP) [A3], kde některé aktivity byly navázány na rozšíření stávajícího nástroje NERUDA. Autor dizertační práce již započal vývoj optimalizačních modelů během magisterského studia, přičemž první verze modelu pro podporu strategického plánování byl představen v diplomové práci [A4]. Nově vyvinuté přístupy byly následně využity při řešení komerčních zakázek nebo při tvorbě podpůrných materiálů pro Ministerstvo životního prostředí ve spolupráci se společností Ernst & Young v roce 2020 [A5].



Obr. 1.2: Návaznosti projektů řešených v rámci aktivit ÚPI na výstupy a jejich aplikace.

Cílem aktuálně běžícího projektu CEVOOH [A6] je vybudování interdisciplinární výzkumné základny v oblasti OH a ObH. Hlavní činností ÚPI v rámci tohoto projektu je rozvoj nových monitorovacích nástrojů v OH. Klíčovým zdrojem dat o produkci a nakládání s odpady je „Informační systém odpadového hospodářství“ (ISOH) [B13], kam jsou data sbírána z ročních hlášení zapojených subjektů v souladu se Zákonem 541/2020 Sb. O odpadech [B14]. Tato databáze je následně předmětem rozsáhlých kontrol a drobných korekcí, jejichž výsledkem je Pracovní databáze ISOH (PDISOH). V rámci tvorby nových přístupů vznikají nové nástroje pro rozsáhlejší kontroly a rekonstrukci toků za účelem vytvoření konzistentní databáze. V projektu jsou jednotlivé přístupy souhrnně označovány jako nástroj REVEDATO, který je vyvíjen zejména pro následující aplikaci při tvorbě podkladů v analytické části Plánu odpadového hospodářství ČR (POH ČR). Z pohledu činností na ÚPI tak lze definovat následující body, které vytyčují základní směry potřebného vývoje podpůrných nástrojů při přechodu na cirkulární ekonomiku.

### I. Kvalita vstupních dat

Nástroje založené na matematických modelech představují silný aparát pro vyhodnocování komplexních systémů z reálného prostředí. Výsledek každého modelu je však pouze tak dobrý, jako jsou dobré vstupní data. Je proto žádoucí se podrobněji zabývat kvalitou vstupních dat, jakým způsobem byla získána a zda-li splňují všechny potřebné návaznosti. V případě OH se jedná především o databázi ISOH [B13], která je tvořena záznamy od samotných subjektů zapojených do systému OH. Reálná praxe však ukazuje, že data obsahují hmotnostní nesoulady napříč celým systémem a závěry plynoucí z jejich vyhodnocení tak mohou být zkreslené, zejména v případě regionálních analýz. S rozvojem digitalizace se navíc stále zvyšuje množství dostupných dat, které je nutné vhodně zpracovávat. Je tedy žádoucí disponovat obecným aparátem pro práci s daty v OH i s ohledem na aktuální vývoj tvorby nové verze PDISOH2 v rámci projektu CEVOOH [A6].

### II. Analýza toku a složení odpadu

Analýza toku odpadu (známá pod označením „Material Flow Analysis“) je často využívána pro vyhodnocení dostupných dat mezi jednotlivými prvky v systému. Toky bývají často graficky znázorněny pomocí Sankeyho diagramu, který umožňuje kontrolovat hmotnostní bilance a identifikovat chybné či neefektivní části systému.

Z pohledu monitoringu dat a následného vyhodnocení může být v některých případech žádoucí sledovat kromě množství i kvalitu odpadu. Data z reálných provozů ukazují citlivost například na výhřevnost spalované směsi, která může významně ovlivnit udržitelnost provozu. Jako další příklad zde lze uvést monitoring kalů z čištění odpadních vod, které jsou evidovány ve zvodnělé formě, avšak klíčová surovina pro materiálové využití představuje sušina, jejíž podíl může být variabilní s ohledem na použitou technologii. Analýza toku by tak měla být doplněna i o odhad složení, aby bylo možné adekvátně vyhodnocovat OH na všech úrovních ČR.

### **III. Lokační a alokační úlohy (modely k přechodu na CE)**

Lokační a alokační optimalizační úlohy představují klíčový koncept v oblasti operačního výzkumu a řízení zdrojů. Tyto úlohy se zaměřují na nalezení optimálních umístění (lokační) a rozdělení zdrojů (alokační) za účelem maximalizace či minimalizace určitého cílového kritéria. Praktické využití lokačních a alokačních optimalizačních úloh v OH je obrovské. Pomáhají minimalizovat provozní náklady, snižovat negativní dopady na životní prostředí díky optimalizované logistice, zlepšovat služby pro obyvatele a efektivně využívat dostupné zdroje. Ve výsledku tak pomáhají přizpůsobit se komplexním výzvám souvisejícím s nakládáním s odpady a podporují trvale udržitelný rozvoj. Klíčové je však vyvinout obecný aparát využitelný pro různé typy úloh v OH.

### **IV. Vícekriteriální úloha**

Již řadu let vstupuje stále více do popředí environmentální kritérium. Na základě ochrany životního prostředí je vyvíjen tlak na vhodné zpracování odpadu, energetický mix, způsoby dopravy a další. Cílem je tak vyhodnocovaný systém posuzovat nejen z ekonomického hlediska, ale zabývat se také produkcí emisí a dopady na životní prostředí. Současně je však nutné zachovat důraz na ekonomickou udržitelnost systému a je tedy nutné volit vhodný kompromis mezi sledovanými indikátory.

### **V. Neurčitost budoucího vývoje**

Plánování a realizace změn v infrastruktuře OH jsou časově i finančně velice náročné procesy, kdy uvedení do provozu od první myšlenky vzniku nového zařízení mohou uplynout vyšší jednotky až desítky let. To je dáno přísnou legislativou a procesem samotné výstavby. Kvalitní vstupní data získaná současným monitoringem však neodráží budoucí změny produkce odpadu, chování občanů, nově vznikající zařízení či úpravy legislativy, které mohou být velmi variabilní při meziročním porovnání. Za tímto účelem vznikají prognózy na základě analýz časových řad a trendu v obsažených datech. S přihlédnutím k expertním odhadům mohou vznikat různé scénáře budoucího vývoje a nově vyvinuté modely pro plánování infrastruktury OH by měly umožňovat jejich zahrnutí a poskytnout tak robustní řešení.

### **VI. Reálné závislosti a územní členění**

Jedním z hlavních cílů nástrojů je jejich následná využitelnost v praxi. V tomto ohledu je tak nutné implementovat vazby na základě dostupných dat přímo z provozů jednotlivých zařízení či technickoekonomických modelů, které však mohou představovat složité a nelineární funkce. Zároveň pro nejpřesnější výsledky případových studií je nutné využít co nejjemnější dopravní síť. V současnosti se často využívají zavedené regiony, které jsou dané historickým vývojem zkoumaného území či platnou legislativou a administrativním dělením. Takovéto územní členění však

většinou nereflektuje řešenou problematiku a je vhodné se tak věnovat vlastnímu návrhu vzhledem k významným parametrům úlohy.

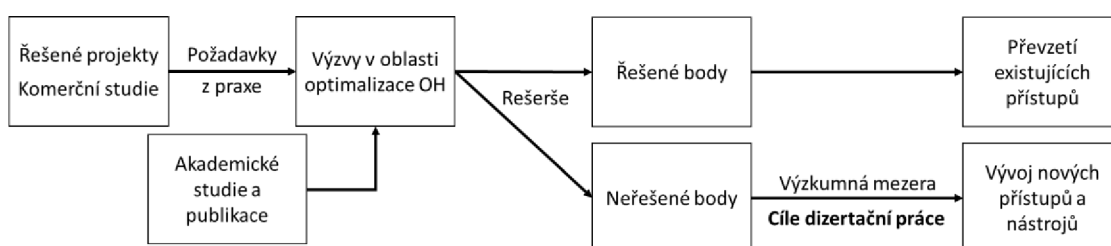
## VII. Výpočetní náročnost

Podmínky definované v předchozích bodech mohou poskytnout větší vhlad do vyhodnocovaného systému a přinést relevantnější výsledky, avšak jejich negativem je výpočetní náročnost. Reálné závislosti jsou často popsány nelineárními funkcemi, které může být obtížné implementovat do matematického modelu při zachování přívětivých vlastností optimalizace. Společně s větším detailem dopravní sítě a množstvím uvažovaných scénářů zároveň roste velikost úlohy. Požadavky na paměť počítače společně s dalšími prvky modelovaného systému mohou vyústit až v neřešitelný problém či získání pouze lokálního optima. To klade nároky na efektivní zápis modelu, volbu vhodného řešícího algoritmu nebo s ohledem na požadované výsledky náležitě aproximovat či zjednodušit vybrané prvky systému.

Dizertační práce „Pokročilé síťové modely v oblasti Oběhového hospodářství“ cílí na vývoj nových matematických modelů, které poskytují podporu pro plánování budoucího vývoje OH a jeho monitoringu. V rámci činností ÚPI lze definovat řadu dalších výzev týkajících se OH či jiných odvětví procesního inženýrství. V prvotní fázi studia bylo však nutné definovat ucelenou skupinu témat s jasným zaměřením a vizí následné možnosti aplikace do reálných studií. Práce by tak měla poskytnout sadu modelů pro obecné použití v oblasti OH stejně tak jako modely na míru pro specifické situace či systémy.

### 1.2 Koncepce dizertační práce

Dizertační práce se podrobně zabývá vývojem nových přístupů k řešení úloh v oblasti OH založených na matematickém programování. Úvodní kapitola práce byla koncipována pro definici možných směrů vývoje s ohledem na potřeby řešených projektů či studií. Na základě definovaných požadavků je následně v prvním kroku realizována podrobná analýza již existujících přístupů a jsou diskutovány jejich výhody a nevýhody. Tento postup umožňuje nasměrovat vývoj správným směrem a řešit klíčové otázky vyplývající z akademických studií. Současně je nutné brát ohled i na požadavky z praxe, jelikož bez následné možnosti aplikace vyvinutých nástrojů se jedná pouze o přístupy tzv. do šuplíku. Rešerše tedy umožňuje z definovaných výzev vybrat ty problematické, kterým dosud nebyla věnována dostatečná pozornost (viz Obr. 1.3). Další kapitoly jsou následně věnovány správě dat z OH, jejich rekonstrukci a analýzám. Kvalitní datové sady a výsledky z monitorovacích nástrojů jsou důležité s ohledem na citlivost navazujících modelů. Hlavní částí je kapitola zaměřující se na modely pro podporu plánování při přechodu na ObH, kde klíčovým výstupem je návrh a dimenzování komplexního zpracovatelského řetězce s ohledem na různé aspekty systému. Poslední kapitola je věnována výpočtové náročnosti a možnostem efektivnějšího výpočtu optimalizačních úloh.



Obr. 1.3: Schéma popisující kombinaci zdrojů k definici cílů dizertační práce.

## 2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

Literární rešerše představuje základní kámen pro vývoj nových modelů, které mohou být následně implementovány do příslušných nástrojů. Cílem je získat podpůrný materiál pro vytyčené cíle plynoucí z reálných požadavků na modelovaný systém během aktivit na ÚPI. Získané poznatky mohou pomoci při správném směřování vývoje, využít již existující přístupy k dílčím tématům a zejména se vyhnout slepým uličkám. Rešerše je rozdělena do tří ucelených kapitol popisující současné studie k jednotlivým tématům, přičemž závěrečná kapitola je věnována souhrnu a definování výzkumného směru.

### 2.1 Analýza monitorovaných dat

Produkce a nakládání s odpady představuje velice regulované a monitorované odvětví v mnoha státech, kde jednotlivé subjekty zapojené do systému OH jsou povinny evidovat příslušné aktivity, jež bývají dále analyzovány příslušnými institucemi [B15]. V průběhu následujících let společně s nárůstem automatizovaných systémů lze očekávat potřebu zpracovávat a řídit databázi včetně informací o typech a množstvích odpadu a metodách jeho zpracování [B16]. Na základě dat je možné vytvořit efektivnější systém OH, proto je nezbytné systematicky analyzovat data pomocí statistických nástrojů k identifikaci potenciálu pro zvýšení recyklace a k plánování zpracovatelského řetězce, jež ve výsledku umožní snížit jeho environmentální dopad [B17].

Řetězec nakládání s odpady je složitý systémový proces, který zahrnuje mnoho subjektů a několik úrovní [B18]. Studie [B15] detailně diskutuje význam analýz toků a vztahů mezi subjekty, stanovení hmotnosti a množství materiálu společně s přesnou geografickou informací. Jedna z největších výzev spočívá v identifikaci toku odpadu od producentů až k místu jeho konečného zpracování, které v rámci řetězce může zahrnovat mnoho předání odpadu mezi subjekty. V datech navíc často existují nesoulady v bilanci produkce a zpracování odpadu, a proto není obvykle možné celý řetězec identifikovat. V tomto detailu je tato informace klíčová zejména pro státní kontrolní orgány a místní samosprávy, kdy není možné vyhodnocovat lokální indikátory vzhledem k produkci. Výše zmíněné problémy mohou vést k nesprávným analýzám a závěrům, jelikož jsou kvůli těmto překážkám využívány agregované průměrné hodnoty. Potřeba vývoje detailnějších analýz toků materiálů je zdůrazněna i studií [B19] za účelem zkoumání materiálových cyklů na úrovni jednotlivých regionů či obcí.

Chyby v datech mohou vzniknout různými způsoby, například lidskou chybou, selháním systému nebo nepřesnostmi při sběru dat [B20]. Tyto chyby mohou mít významný vliv na přesnost a spolehlivost dat, a proto jsou data analyzována pomocí statistických nebo optimalizačních technik v různých odvětvích průmyslu [B21]. Statistické metody se běžně používají pro standardizaci a kontrolu kvality, zejména pak k ověřování dat a k identifikaci chyb. Analýza toku materiálu („Material Flow Analysis“) nebo energie („Energy Flow Analysis“) na základě zobrazení pomocí Sankeyho diagramu se často používá k analýze procesů, zkoumání interakcí, identifikaci největších ztrát a přesnému zásahu do systému pro zlepšení efektivnosti [B22]. Další techniky, jako je analýza hlavních komponent („Principal Component Analysis“) [B23] nebo shluková analýza („Cluster analysis“) [B24], lze použít k identifikaci vztahů v datech a oblastí, kde data chybí nebo jsou nesourodá. Tyto metody lze také použít k modelování chybějících dat a k opravě chyb v datech.

Optimalizační modely jsou více využívány k optimalizaci samotného procesu a získání optimálních nastavení pro dosažení vyšší účinnosti [B25]. Nicméně přístupy založené na matematickém programování mohou být také použity k identifikaci a korekci chyb v datech. V této souvislosti je možné považovat za nejčastěji používaný aparát vyrovnání dat, které porovnává a upravuje různé sady dat, aby se zajistila jejich konzistence [B20]. Vyrovnání dat lze považovat za dobře známý princip již několik desetiletí [B26], který je často využíván v mnoha aplikacích k zajištění shody dat z různých zdrojů, jako jsou senzory či výsledky z modelů [B27]. Cílem vyrovnání dat je poskytnout jednu spolehlivou sadu dat, která může být následně využita pro další analýzy a související rozhodování v oblasti plánování.

Například studie [B28] využívá vyrovnání dat při dynamické regulaci obnovitelných zdrojů energie, což umožňuje vyrovnávat nesrovnalosti v měřeních senzorů. Autoři dalšího článku [B29] popisují problematiku týkající se přesnosti výpočtů výroby parní turbíny. Navržen je model na principu vyrovnání dat, který zahrnuje omezení nárůstu entropie a využívá nelineární nerovnostní omezení k detekci závažných chyb. Článek [B30] se zaměřuje na integraci vyrovnání dat do alokačních úloh, konkrétně v petrochemickém průmyslu. Autoři se zabývají identifikací a korekcí chyb v datech týkajících se proudění v potrubí a zároveň analyzují směšování více produktů s různými vlastnostmi. Výsledek vyrovnání dat je velice závislý na kovarianční matici [B31], která běžně obsahuje pouze diagonální hodnoty odrážející směrodatnou odchylku jednotlivých měření či přesnost senzorů. Tento přístup však nemůže být využit pro případ správy dat z OH, kde jednotlivá hlášení představují pouze jednu hodnotu bez přímé informace o kvalitě ohlašovatele. Zároveň je třeba řešit případy, kdy hlášení v evidenci zcela chybí a tyto záznamy je třeba zrekonstruovat.

Při bližším zkoumání studií v oblasti OH jsou analýzy chyb v systému opět zaměřeny na konkrétní procesy v oblasti nakládání s odpady. Například studie [B32] představuje řešení vedoucí ke zlepšení přesnosti měření v procesu čistírny odpadních vod. Obecně lze konstatovat, že publikované přístupy jsou často omezeny jen na konkrétní proces. Cílem by mělo být lokální studie zobecnit a rozšířit na celostátní úroveň společně s regionálním detailem a možností bodových analýz. V rámci výzkumu na ÚPI se tomuto rozšíření autoři věnovali v publikaci [B33], kde se využívá forma vyrovnání dat k opravě chyb mezi produkcí a zpracováním odpadů společně s trasováním odpadu. Navržený přístup však naráží na výpočetní náročnost a navrhaný model není možné aplikovat v maximálním možném detailu na úrovni jednotlivých evidencí.

Zpracování velkého objemu dat na národní úrovni je také využíváno k prognózám budoucího vývoje [B34]. V oblasti nakládání s odpady na ÚPI byla publikována studie [B35] představující matematický model pro odhad budoucí produkce odpadu. Podobný princip se také používá při předpovídání zpracování odpadu pro jednotlivé země v rámci EU [A1]. Nicméně studie se nevěnují opravě chyb a využívají vyrovnání dat pro vytvoření konzistentních odhadů z modelovaných hodnot v různém územním detailu. Rozsáhlejší studie zaměřené na monitorování nakládání s odpady obvykle neřeší nesoulady v datech a implementují pouze postupy související se základní analýzou nebo s procesem zvaným „data mining“ [B36].

Z literárního přehledu vyplývá, že vývoji komplexního nástroje pro zajištění konzistence rozsáhlých databází v oblasti nakládání s odpady není věnována dostatečná pozornost. Použití sofistikovaných modelů pro hodnocení toků odpadů a jejich zpracování lze považovat za vhodnější než zvyšování povinností subjektů v systému hlášení. Navíc běžně využívaná analýza toků materiálu (MFA) neposkytuje informace o kvalitě jednotlivého

proudu. Příkladem vylepšeného přístupu k MFA je studie [B37], kde autoři vyvinuli pravděpodobnostní přístup založený na Monte-Carlo simulacích se zaměřením na obsah fosforu v oceli. Nicméně simulace Monte-Carlo jsou velmi omezené v případě velkých datových sad. Rešerše tedy zdůrazňuje důležitost správy dat v oblasti nakládání s odpady a potřebu komplexního nástroje. To může pomoci identifikovat kritické regiony a minimalizovat environmentální dopad, optimalizovat nakládání s využitelnými složkami odpadu či zlepšit celkovou efektivitu strategického plánování.

## 2.2 Přejít na cirkulární ekonomiku

Stěžejním bodem dizertační práce je vývoj nových podpůrných nástrojů pro efektivní přechod z lineárního řetězce na cirkulární ekonomiku. Nové modely by měli mít možnost zohledňovat kompletní řetězec od producenta až k finálnímu zpracování nezpracovatelných odpadů, což sebou nese nutnost modelovat i dílčí články a vazby mezi nimi. Současně je nutné, aby modely obsahovaly skutečné parametry a závislosti jednotlivých prvků systému, což následně poslouží i jako vyhodnocení dílčích projektů a jejich konkurenceschopnost. OH lze považovat za velmi aktuální téma a v rámci poslední dekády se tedy mnoho autorů zabývalo problémy nakládání s odpady pomocí různých přístupů, které jsou různě komplexní a výpočetně náročné [B38].

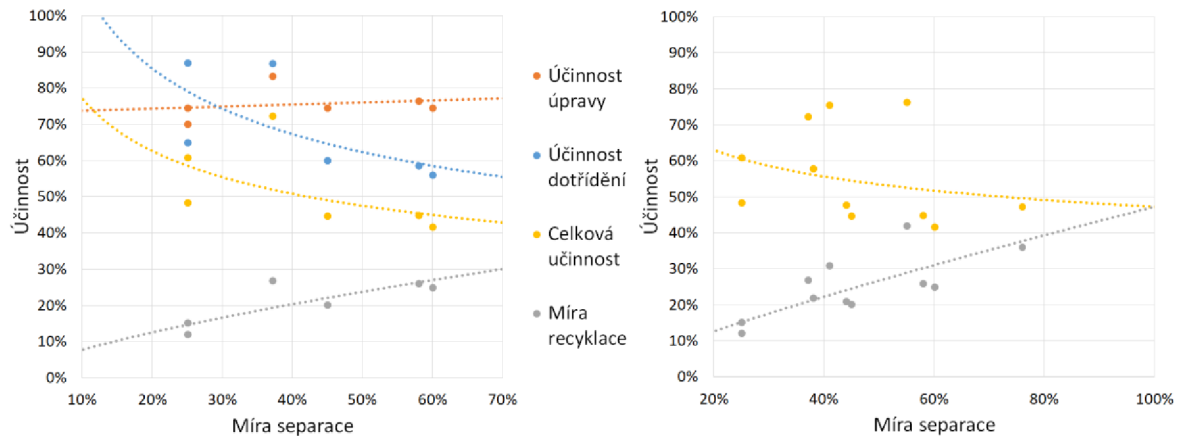
Některé předchozí studie se zabývaly optimalizací toků odpadu v síti a hledáním nejlepšího místa pro realizaci zařízení na energetické využití odpadu [B39]. Konceptuální plánovací přístupy obvykle řeší určení vhodného umístění zařízení [B40] a jejich kapacit [B41], stejně jako volbu tras sběru odpadu [B42], včetně překládacích stanic [B43] pro efektivní dopravu a zajištění udržitelnosti celého systému. Dalším přístupem v oblasti sběru odpadu je problematika návrhu svozových tras přímo pro konkrétní vozidla [B44]. Další části řetězce zohledňuje například článek [B45], kde autoři představili vícekriteriální model pro lokalizaci zařízení včetně reziduálních toků mezi zařízeními. Autoři však zohledňují pouze jeden typ odpadu, kdy jednotlivé proudy se ve skutečnosti mohou významně ovlivňovat.

Vícekriteriální optimalizace v současnosti nabývá stále více na významu, jelikož je nutné plnit nastavené cíle plynoucí z environmentálních cílů, ale zároveň zajistit ekonomicky udržitelný systém [B46]. Autoři ve studii [B47] se zabývali komplexním modelem popisujícím systém nakládání s odpady s ohledem na ekonomické, environmentální a sociální cíle. Účelovou funkci v podobě pouze ekonomických návazností představili autoři ve studii [B48], kde environmentální kritérium bylo převedeno do omezujících podmínek. Další článek, který se zabývá komplexním systémem nakládání s odpady ve městě Teherán se zohledněním více kritérií, je [B49]. Nicméně, stejně jako v případě studie [B50], autoři zohledňují v rámci recyklace předem definované účinnosti, avšak jedná se pouze o fixní průměrné hodnoty. Recyklaci odpadu lze obecně považovat za složitý proces, jehož účinnost může být ovlivněna mnoha faktory [B51]. Jako jeden z hlavních faktorů je chování samotných spotřebitelů a producentů odpadu.

Tříděné složky odpadu musí být již před zpracováním tříděny a recyklovány, než mohou být použity jako sekundární surovina. Při pohledu na základní tři komodity jako je plast, papír a sklo, představuje sklo nejlépe recyklovatelný odpad a jeho zpracování si většinou zajišťují samotné sklárny. V případě plastu a papíru se zpracování odpadu skládá ze dvou hlavních částí. První částí je odstranění znehodnocených nebo kontaminovaných částí na dotřídňovací lince a také vytrídění některých speciálních či kompozitních typů a všech materiálů, které nelze za současných technicko-ekonomických podmínek recyklovat. Po dotřídění odpadu je



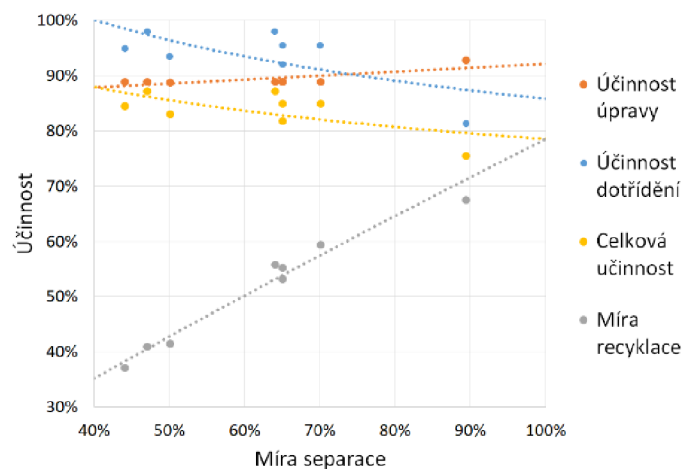
odpad přeměněn do formy, která je snáze tvarovatelná a následně lépe využitelná, například granulovaný plast apod. K získání účinnosti dotřídění odpadu byly využity studie založené na „Material Flow Analysis“, jejichž kompletní výčet lze dohledat v publikaci [A7]. Získané informace o účinnosti jednotlivých procesů byly podrobně analyzovány a proloženy exponenciální funkcí za použití metody nejmenších čtverců. Výsledná funkce účinnosti recyklace pro plasty je uvedena na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Data týkající se účinnosti recyklace plastů včetně modelové funkce.

Je třeba poznamenat, že v analyzovaných studiích nebyly u všech k dispozici informace pro každou část recyklačního procesu. Ve výsledku tak jsou na obrázku k dispozici dva grafy, přičemž druhý z nich ukazuje přesnější odhad účinnosti celého procesu recyklace kvůli většímu množství využitých dat. Ze získané funkce je zřejmé, že účinnost druhé fáze recyklace (úpravy) plastů již nezávisí na míře separace a může být považována za konstantní. Naopak účinnost dotřídění plastů je velice závislá na míře separace, kde s vyšším úsilím občanů o třídění odpadu se začínou ve žlutých sběrných nádobách objevovat ve větší míře nerecyklovatelné materiály. Z těchto výsledků také vyplývá, že skutečné materiálové využití může dosáhnout hodnot maximálně okolo 50 %.

Stejný postup zpracování dat byl využit i v případě recyklace papíru. Konkrétní hodnoty a detaily lze opět nalézt v publikaci [A7]. Výsledné závislosti účinnosti recyklace na míře separace je znázorněna na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Data týkající se účinnosti recyklace papíru včetně modelové funkce.

V případě papíru lze pozorovat podobnou závislost jako v případě plastu. Účinnost úpravy papíru lze až na drobné odchylky opět považovat za konstantní s hodnotou kolem 90 %. Účinnost dotřídění klesá s rostoucí mírou separace, avšak oproti plastového odpadu je možné v případě papíru dosáhnout mnohem vyšší celkové účinnosti recyklace okolo 80 %. Ve výsledku tak lze z analyzovaných článků potvrdit existenci vazby mezi mírou separace a účinností recyklace. S vyšší mírou třídění se do separovaného odpadu dostává více nežádoucích komponent a proces se tak stává méně efektivním. Proto maximální míra recyklace nemusí být pro všechny komodity nejlepším řešením a bylo by vhodné pokusit se stanovit optimální možnou míru.

Z uvedených závislostí je zřejmé, že materiálové využití odpadu naráží na limity definované parametry jednotlivých frakcí. Nerecyklovatelný odpad je však nutné vhodným způsobem zpracovat a až v nejkrajnějším případě uložit na skládku. Zatímco jsou hledány nejlepší příležitosti ke snižování produkce skleníkových plynů [B52], lze pozorovat rostoucí trend spotřeby energie a je nutné hledat alternativy k fosilním palivům [B53]. Jedním ze zkoumaných parametrů odpadu jsou právě termochemické vlastnosti, kdy v případě SKO může být výhřevnost odpadu srovnatelná například s hnědým uhlím [B54]. Kromě SKO jsou ke spalování vhodné i další druhy odpadu jako je objemný odpad [B33] nebo právě zmíněná rezidua z dotřídňovacích linek [B7]. Kombinace rostoucí poptávky po energiích, hledání alternativních zdrojů a potřeby zpracování odpadu tak představuje ideální řešení pro několik současných problémů. Je však nutné zajistit výstavbu vhodných technologií včetně čištění spalin.

Výhřevnost odpadu v současnosti představuje z pohledu odpadové legislativy [B14] klíčový parametr, jelikož definuje využitelný a nevyužitelný odpad. Energetický zisk spalovacího procesu může být vyjádřen pomocí výhřevnosti „Lower Heating value“ (LHV), která představuje celkový obsah energie se zohledněním výparného tepla [B55]. Alternativou je „Higher Heating Value“, která však teplo nutné ke změně skupenství neuvažuje. Při kogeneraci tepla a elektřiny však dochází ke změně skupenství mezi vodou a párou, a proto je nutné uvažovat právě hodnotu LHV. V Tab. 2.1 je uveden přehled nejběžnějších typů odpadu a jejich hodnotu LHV. Podíl každého typu odpadu na komunálním odpadu je stanoven na základě průměrného množství vygenerovaného odpadu v období 2016 až 2018 v ČR [B13].

Tab. 2.1: Přehled nejběžnějších typů odpadů a jejich výhřevnost.

Typ odpadu	Podíl v KO	LHV [MJ/kg]	Zdroj
Plast	2,7 %	17,1 až 38,6	[B56]
Papír	9,3 %	10,2 až 15,1	[B56]
Sklo	2,5 %	0	Nespalitelný
Bioodpad	14,2 %	3,8 až 5,5	[B56]
Textil	0,5 %	15,2 až 19,6	[B56]
Dřevo	1,3 %	15,7 až 18,2	[B56]
Kov	5,0 %	0	Nespalitelný
SKO	48,8 %	7,0 až 11,0	[B57]
Objemný	9,9 %	18,0 až 22,0	[B58]

Z uvedených hodnot je patrné, že výhřevnost odpadů je velice variabilní a závisí na složení jednotlivých odpadových proudů, které se může regionálně lišit na základě sociálně-ekonomických podmínek. Výzkumné studie a reálné provozy potvrzují, že je nutné se zabývat i právě výhřevností odpadu, jelikož v případě energetického využití odpadu může složení spalované směsi ovlivňovat samotný provoz zařízení [B59]. Konkrétně v případě

zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO) je důležitá poptávka jak po elektřině, tak zejména po teple. Proto je nutné tyto aspekty zohlednit již při samotném návrhu zařízení a celé zpracovatelské infrastruktury [B60]. Většina studií zabývajících se složením a výhřevností odpadu je řešena pouze v kontextu návrhu konkrétního zařízení. Nicméně z pohledu širšího koncepčního plánování není tento aspekt zohledněn nebo je řešen pouze v úzkém měřítku. Například v již zmíněné studii [B50] byla výhřevnost uvažována pouze pro reziduální toky odpadu, které byly modelovány jako homogenní směs s fixními parametry. Klíčovým aspektem efektivního plánování je také implementace nejistoty týkající se odhadů vstupních parametrů pro získání robustních výsledků [B61].

V detailním literárním přehledu [B62] zkoumali autoři nastavené cíle a omezení v oblasti nakládání s odpady. Analyzováno bylo více než 150 článků, z nichž některé byly věnovány stochastické optimalizaci, jejíž zaměření je právě na řešení úloh s neurčitým budoucím vývojem. Ve studii [B63] byl představen stochastický model popisující komplexní řetězec, kde nejistota byla řešena z pohledu poptávky a provozních podmínek. Další model zachycující nejistotu v nakládání s odpady byl uveden v [B64], kde byla použita optimalizace s intervalovými čísly pro minimalizaci produkce emisí. Dále dvojice po sobě jdoucích článků [B65] a [B66] představila komplexní studii nakládání s odpady v Pekingu založenou na scénářích možného vývoje s použitím fuzzy hierarchického programování. Modelované scénáře zohledňovaly různé směry vývoje legislativy v OH a různé technologie zpracování odpadu.

Autoři článku [B67] představili vícekriteriální stochastický model pro sběr komunálního odpadu, přičemž nejistota byla zohledněna vzhledem k počtu obyvatel jako jeden z hlavních faktorů ovlivňující množství produkovaného odpadu. Ve studii [B39] byla nejistota řešena pouze z hlediska produkce komunálního odpadu jako celku, a nikoliv jako toku několika druhů odpadu s různými vlastnostmi. Dvoustupňový stochastický model byl představen ve studii [B68], kde předmětem optimalizace byl uzavřený dodavatelský řetězec s ohledem na variabilní provozní náklady spojené s neurčitou poptávkou. Často je nejistota implementovaná v podobě scénářů, které byly využity například pro optimalizaci nakládání s odpady ve studii [B69]. Obdobná studie, avšak s větším důrazem na ZEVO a logistiku, byla představena v práci [B70], kde autoři podrobně popsali návrh zvažovaných scénářů s ohledem na možné nepřesnosti.

Komplexní přehledová studie zaměřující se na modely dodavatelského řetězce [B71] analyzovala více než 200 článků publikovaných po roce 2000. Články byly seskupeny podle různých úrovní rozhodování v řetězci, sledovaného kritéria a vybraného postupu řešení. Podobná rešeršní studie [B72] se zaměřila na logistiku se zpětnými proudy v plánování uzavřených řetězců. Zmíněné detailní analýzy a uvedené studie poukazují na výzkumnou mezeru a příležitost rozšíření stávajících modelů právě v implementaci reálných závislostí založených na datech ze skutečných provozů. Články obvykle nepopisují spojení mezi mírou třídění a mírou recyklace a zároveň nebývá zohledněno složení odpadových proudů v návaznosti na výhřevnost spalované směsi, která je dle nového zákona v ČR měřítkem využitelného odpadu [B14]. Většina studií je také zaměřena na dílčí prvky odpadového řetězce a komplexní modely popisující vazby mezi jednotlivými subjekty včetně nejistot nejsou dostatečně řešeny. Pozornost by tedy měla být věnována právě těmto nedostatkům, které mohou hrát klíčovou roli v efektivním plánování nakládání s odpady.

## 2.3 Výpočtová náročnost

Mnoho nástrojů pro podporu logistiky a plánování vhodné infrastruktury ke zpracování odpadu je založeno na principu toku v síti, kde jednotlivé uzly mohou představovat obce a hrany dopravní infrastrukturu mezi nimi. Nicméně s narůstající digitalizací, objemem dat a potřebným detailem výsledků dosahují řešené systémy svých výpočetních limitů. V případě zahrnutí reálných závislostí, které jsou převážně popsány pomocí nelineárních funkcí, se tyto problémy stávají prakticky neřešitelnými navzdory dnešním výpočetním možnostem. To je způsobeno kombinatorickým nárůstem parametrů a proměnných pro optimalizační software, kdy většina úloh v tomto odvětví je známá jako „NP-Hard“ s polynomiální složitostí [B73]. S ohledem na význam těchto nástrojů je však nezbytné poskytnout alespoň nějaké řešení, i když bude ovlivněno aproximací některých závislostí nebo bude pouze lokálně optimální. Za tímto účelem byla provedena rešerše již existujících přístupů při řešení rozsáhlých úloh. Články byly vyhledávány pomocí klíčových slov „decomposition“, „heuristic“, „clustering“, „large-scale model“, „model reduction techniques“, „network flow model“, „machine learning“ a jejich kombinací. V následující části jsou komentovány především články, které měly návaznost na řešenou oblast dizertační práce, tj. přístupy, které snižují časovou náročnost optimalizačního problému nebo řeší problémy s pamětí při velkém počtu proměnných.

Při řešení velkých úloh, které nelze optimalizovat klasickými metodami a přístupy, jsou často vyvíjeny heuristické algoritmy [B74]. Tyto algoritmy kombinují různé přístupy k vyhledávání přípustných řešení, které mohou zahrnovat expertní odhady a zkušenosti s řešeným problémem. Jako klíčová část efektivní optimalizace je nezbytné správné formulování řešeného problému, což může významně urychlit výpočet [B75]. V rámci OH lze lokální úlohy řešit pomocí vícestupňového programování [B76] a výsledné složité problémy je možné řešit heuristikami nebo například pomocí genetických algoritmů [B77]. Ve studii [B78] autoři dospěli k závěru, že heuristické přístupy představují neustále se rozvíjející směr současného výzkumu v operačním výzkumu. Jejich velkou nevýhodou je však absence informace o kvalitě či výhodnosti získaného řešení v rámci přípustné množiny a snahou těchto algoritmů je tak poskytnout alespoň nějaké řešení, které se slučuje s realizovatelností.

Podle článku [B79] mohou být heuristické algoritmy také podporovány strojovým učením, které může poskytnout klíčové informace na základě vhodné analýzy a zpracováním velkého objemu dostupných dat. Například studie [B80] si klade za cíl takto vylepšit existující heuristiku „Column Generation“ pro routinové problémy. Právě strojové učení a neuronové sítě mohou významně přispět při řešení složitých a rozsáhlých problémů, což dokazuje i jejich narůstající popularita. Podle studie [B81] mají přístupy založené na strojovém učení pět typických aplikací: klasifikaci, regresi, detekci anomálií, shlukování a redukci dimenze řešeného problému. Studie [B82] se konkrétně zabývala využitím strojového učení k řešení maximálního toku v síti a podobně jako další studie, využívá strojové učení přímo k nalezení výsledku původního problému. Aplikace strojového učení jako podpůrný nástroj před samotnou optimalizací není však příliš využívána, zejména pak v kontextu návrhu dopravní sítě. Na tento fakt poukazuje i souhrnná přehledová studie [B83], kde je zdůrazněna významnost klasifikace dat, jenž může být důležitou součástí přípravy grafické struktury před aplikací optimalizačních algoritmů.

Mezi další skupinu přístupů pro řešení rozsáhlých úloh patří také dekompozice, která vede k rozdělení úlohy na několik dílčích problémů, které jsou řešeny samostatně. Následně

mohou být dílčí řešení propojeny pomocí různých technik s iterativními výpočty, nebo řešení mohou být využita jako startovací bod pro celkovou optimalizaci, jenž může výrazně snížit výpočetní čas. V článku [B84] se autoři zaměřili na řešení dopravních úloh s využitím heuristik a dekompozice označované jako „Benders decomposition“. Jako další studii lze zmínit [B85], kde byly použity tři techniky dekompozice pro železniční síť při řešení optimalizace řízení dopravy. Autoři použili různé distribuované optimalizační přístupy k zohlednění spojení mezi dílčími problémy. Studie [B86] se následně podrobněji zabývá řešením úloh, kde dekompozice vede na tzv. „Overlapping sub-problems“, jenž představují problémy při následném spojení. Jedná se o častou situaci, kdy dílčí úlohy získané dekompozicí mají společné některé proměnné. Ve své podstatě se jedná o největší překážku v aplikaci dekompozičních metod. Autoři konkrétně představují různé strategie, které testují na vybraných funkcích.

Často jsou v rámci odborných článků využívány přístupy, které se pokoušejí identifikovat a odstranit nepotřebné proměnné na základě určitých parametrů. Autoři v článku [B87] využívají rámcovou strukturu P-grafu pro popis modelovaného systému, která generuje maximální možnou strukturu. Před samotným výpočtem jsou však některé proměnné v kontextu daných omezení nebo nevýhodných řešení vynechány. Hlavním cílem autorů je ale další redukce spočívající ve výběru pouze výhodných struktur s ohledem na řešený problém. Tato myšlenka byla aplikována při optimalizaci logistického řetězce pro biomasu ve studii [B88] omezením hran nad určitou vzdálenost a eliminací těch proměnných, které jsou vzhledem k toku v síti bezvýznamné (nulová produkce nebo kapacita). Klíčovou myšlenkou je nahradit nebo omezit původní model a přitom zachovat původní optimální řešení v rámci přípustné množiny. Většina přístupů však obvykle nemůže zaručit přítomnost optimálního řešení v redukované síti. Ve skutečnosti je obtížné chybu přesně kvantifikovat, na druhou stranu by měl existovat alespoň odhad chyby, který může být ověřen na různých simulacích podobných ale menších úloh. Jednotlivé přístupy k redukci lze rozdělit do několika kategorií podle použité techniky mezi agregací struktur, kompresí (odstraněním nadbytečných struktur), zjednodušením a aproximací [B89].

Nedávná studie [B90] týkající se metodiky redukce pro dopravní síť představila algoritmy, které identifikovaly kostru původního grafu vhodnou pro další analýzu. Zaměřovala se na uzly charakteristické nízkým počtem stupňů, které mohou představovat slepé cesty a mohou být sloučeny a nahrazeny jedním uzlem. Podobný princip redukce velikosti grafu byl představen ve studii [B91], kde byl vyvinut přístup k efektivnímu ukládání rozsáhlých dat k urychlení výpočetních algoritmů. Byly představeny dva přístupy pro identifikaci hran, které zachovávají očekávané rozložení stupňů uzlů a zároveň zachovávají topologii sítě. Rozsáhlý „NP-Hard“ problém byl také řešen v [B92], kde byly představeny tři heuristiky pro redukci úlohy toku více komodit v síti, kde jedna z heuristik byla zaměřena přímo na redukci hran s využitím relaxace celočíselných proměnných a případné fixace, kdy byly sledovány změny ve speciální účelové funkci.

Další široce používanou technikou redukce velikosti je shluková analýza, která se stala populárním tématem výzkumu v oblasti OH podle [B93]. Autoři této studie studovali 61 článků o různých aplikacích shlukování v OH, přičemž většina z nich byla publikována před rokem 2020. V článku [B94] autoři navrhli shlukování zákazníků do zón s třídícími linkami a infrastrukturou pro individuální sběr odpadu. Shlukování bylo přímo implementováno do optimalizačního problému a funkčnost celého přístupu byla verifikována na regionálním případovém studiu v Thajsku. Ve studii [B95] bylo navrženo vylepšené hierarchické shlukování k seskupení bodů sběru odpadu a následně byl pro každý shluk řešen problém

logistiky zvláště. Problém sběru a dopravy odpadu byl řešen také v [B96] pro oblast v Tunisku, kde byla opět využita myšlenka shlukování pomocí algoritmu „K-means“. Podobný přístup byl využit v [B97] k optimalizaci recyklace pneumatik ve 81 městech Turecka. V článku [B98] byl namísto dekompozice problému využit algoritmus shlukování k odhadu počtu velkých kontejnerů. Problematika umístění kontejnerů pak byla řešena detailně ve vybraných územích a následně rozšířena pomocí lineární regrese až do požadovaného počtu kontejnerů.

Z výzkumných studií a souhrnných přehledových článků lze obecně konstatovat, že současným úsilím autorů je aproximovat grafické struktury pomocí agregací, které jsou založeny na shlukové analýze a podobnostech v systému. Dekompozice problému a řešení dílčích sub-problémů jsou rovněž široce využívány, ale jejich aplikace je výrazně závislá na povaze zkoumaného problému. V případě detekce optimálních struktur v grafu, se studie zaměřují především na analýzu základních parametrů jeho prvků. Obecně lze očekávat nejlepší výsledky pomocí různých kombinací uvedených přístupů aplikovaných přímo na vlastní modely. Cílem je vytvořit obecný přístup pro řízení výpočtové náročnosti optimalizačních problému založených na toku v síti. S ohledem na strukturu dopravní sítě, její vliv na výpočtovou náročnost a zachování exaktních algoritmů pro řešení optimalizace se jeví jako účinná metoda redukce, ať už z pohledu uzlů či hran. Zejména se pak nabízí možnost kombinace optimalizace a strojového učení, která může poskytnout potřebný aparát pro řešení rozsáhlých aplikací.

## 2.4 Výzkumná mezera a zaměření dizertační práce

Během analýzy několik desítek článků a případových studií bylo v případě vývoje matematických modelů v oblasti OH definováno několik nedostatků, které lze shrnout do následujících bodů:

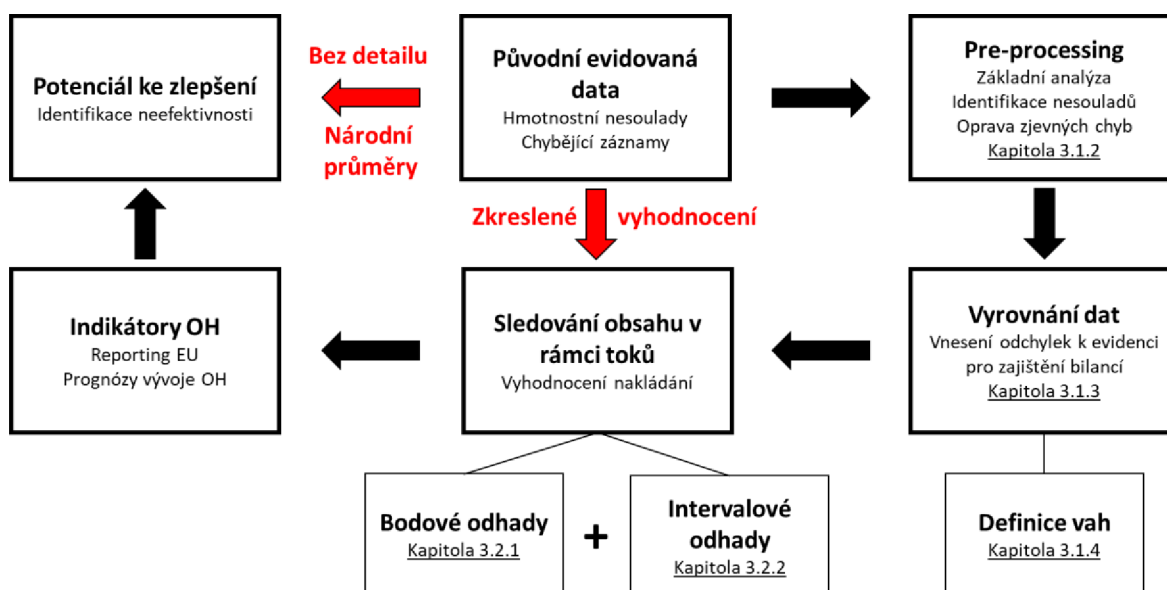
- **Nedostatečná pozornost vývoji komplexního nástroje pro konzistenci dat:** V současnosti není kladen důraz na správu dat a monitoring OH, jejich komplexní analýzu a rekonstrukci pro zajištění konzistentní sady dat. Potřeba disponovat takovým nástrojem je podpořena nárůstem digitalizace a objemem zpracovávaných dat. Výstupem by měla být konzistentní sada dat, která bude splňovat definované podmínky (hmotnostní bilance aj.) a bude vhodná pro navazující analýzy a strategické plánování.
- **Nedostatečná analýza kvality odpadových proudů:** Běžně používaná analýza toků materiálu neposkytuje informace o kvalitě či složení jednotlivých odpadových proudů, což je důležité pro vyhodnocení nakládání s odpady a identifikaci regionů s nedostatečnou zpracovatelskou infrastrukturou či neefektivním nakládáním.
- **Potřeba komplexního modelu pro plánování infrastruktury OH:** Použití sofistikovaných modelů pro podporu strategického plánování a vyhodnocení toků odpadů včetně jejich zpracování má velký potenciál pro zlepšení efektivity a minimalizaci environmentálního dopadu. Hlavním nedostatkem dosud představených článků je to, že jsou zaměřené na samostatné problémy nebo nezahrnují všechny potřebné vazby. Uvažovaný zpracovatelský řetězec je nutné řešit v celém rozsahu a v maximálním možném detailu pro získání odpovídajícího vhledu do problematiky. Současně je nutné implementovat dílčí procesy společně se závislostmi vyplývající z reálných provozů.

- **Kombinace různých přístupů k redukci rozsáhlých úloh:** Kombinace optimalizačních metod a strojového učení má potenciál poskytnout potřebný aparát pro řešení velkých a komplexních aplikací v oblasti nakládání s odpady. Přínosné může být využít strojové učení k pre-processingu vstupních dat před samotnou optimalizací namísto cílené identifikace vhodného řešení. Nejlepších výsledků redukce úloh je pravděpodobně možné dosáhnout využitím několika redukčních přístupů najednou s různým zaměřením na grafické struktury.

### 3 SPRÁVA DAT ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

Nový zákon o odpadech [B14] přinesl mnoho změn nejen z pohledu cílů pro navýšení recyklace, ale i v oblasti vykazování dat. Data jsou sbírána prostřednictvím každoročního hlášení o produkci a nakládání s odpady, které následně představují základní kámen pro tvorbu výkazů či reportů do EU či pro strategické plánování a úpravy legislativy v OH. Jednotlivé subjekty však výkazy evidují jako samostatné jednotky, a i přes víceetapovou kontrolu hlášení (ORP, kraje, CENIA [B99]) se v datech vyskytují hmotnostní nesoulady na všech úrovních systému. Ve výsledku tak není z dat zřejmé, kolik odpadu bylo vyprodukováno a jak byl zpracován, zejména v detailnějším měřítku jednotlivých krajů či ORP. Plánovat potřebnou zpracovatelskou infrastrukturu či provádět legislativní zásahy může následně vést k neefektivním opatřením. Cílem je tak vyvinout obecný přístup pro správu dat libovolného odpadového proudu a jeho vyhodnocení s tím, že se odstraní hmotnostní nesoulady v systému s co nejmenším zásahem do původních dat. To následně umožní sledovat tok materiálu (např. i včetně jeho kvality) a ve výsledku tak pracovat s kvalitnější sadou dat. Zkvalitnění datové sady je možné realizovat také větší administrativní zátěží, avšak využití matematického aparátu umožní získat ze současného stavu maximum.

Řada analýz reportovaných dat a jejich vyhodnocení se opírá o platnost fyzikálních zákonů, zejména pak hmotnostních bilancí, které v případě porušení často představují složitý problém, jenž v řádném detailu není možné s ohledem na výpočetní náročnost řešit. Největší problém představuje spojení odpadu od různých producentů, který pak není možné v daném místě jednoznačně identifikovat. Tuto problematiku lze řešit vhodnou heuristikou, která poskytne odhady kompletních řetězců od producenta až ke zpracovateli, případně lze pro vyhodnocení kvality toku využít vážený průměr. Ten však představuje nelineární problém a jak je obecně známo, nelineární úlohy je obtížné řešit, zejména pak v rozsahu jednotlivých států a s adekvátním detailem na jednotlivé dílčí územní celky. Pro kompletní správu dat v OH a analýzu toku je tak nutné vyvinout nový přístup s kombinací různých matematických přístupů. Z tohoto důvodu je problematika rozdělena do několika bloků, jejíž obecný rámec je znázorněn na obrázku Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Obecný rámec přístupu ke správě a vyhodnocení dat OH.



Cílem schématu je poukázat na skutečnost, že přímá identifikace potenciálních zlepšení z původně hlášených dat je komplikovaná a nepřesná, protože řada indikátorů může být zkreslena chybami a obvykle tak v současnosti jsou vyhodnocovány pouze celostátní průměry a nejsou k dispozici reporty v potřebném detailu. Potřebného detailu je možné dosáhnout s využitím analýzy toku odpadu, která však v případě nezajištění hmotnostních bilancí může poskytnout zkreslené odhady toku či s využitím průměru mohou být ztraceny důležité vazby v systému. Jako nejlepší řešení lze považovat postupný přístup s využitím dílčích matematických aparátů, kde je nejdříve zajištěna konzistence datové sady, následně jsou vyhodnoceny toky odpadu, ze kterých lze vypočítat indikátory a potenciál pro zlepšení v jednotlivých regionech. Splnění hmotnostních bilancí je v tomto směru klíčové, jelikož zajistí, že žádný materiál nevstoupí či neopustí systém bez náležité produkce nebo zpracování. Díky konzistenci dat je pak možné poskytnout relevantní odhady toku odpadu včetně jeho vlastností s využitím jak bodových odhadů, tak i intervalových poskytující informaci o variabilitě. Dílčí bloky uvedené v Obr. 3.1 budou podrobněji popsány v rámci následujících kapitol.

### **3.1 Analýza a rekonstrukce dat**

Tato kapitola se podrobněji zaměřuje na zajištění hmotnostních bilancí na všech úrovních systému s cílem poskytnout věrohodnější sadu dat, která může být využita jako vstup do navazujících analýz či optimalizačních nástrojů. Přístup je založen na důkladné analýze všech subjektů v systému, vyhodnocení jejich hmotnostních bilancí a následné opravě pomocí předem definovaných oprav či matematického modelu vyrovnání dat. Celá metodika je cílena na data týkající se OH a s tím související strukturu hlášení a patřičných informací. Přístup je však možné využít i v dalších odvětvích při zohlednění odpovídajících pravidel ve vykazování. Kapitola představuje shrnutí základních principů evidence a vyvinutých matematických modelů. Konkrétně se jedná převzatou publikaci autora této dizertační práce [A8], kde lze dohledat případné detaily.

#### **3.1.1 Struktura dat OH**

Evidovaná data splňují přísnou formu vykazování dle platné legislativy. Klíčovým dokumentem v tomhle směru je 541/2020 Sb. Zákon o odpadech [B14] společně s prováděcími vyhláškami. Odpady je možné rozdělit dle Katalogu odpadů definovaným vyhláškou č. 8/2021 Sb. [B100], kde na základě několika úrovní je tvořeno 6místné číselné označení, které v některých případech může obsahovat další podskupiny. Zákon o odpadech také definuje kódy nakládání neboli označení způsobu, jakým byl odpad zpracován nebo jaký je původ produkce. Principy evidence nakládání s odpady upravuje vyhláška 273/2021 Sb. [B101], kde jsou uvedeny úpravy značení specifických typů nakládání. Součástí vyhlášky jsou také příslušné listy, které musí subjekty vyplňovat. V rámci správy a evidence dat je důležitý „List 2: Hlášení souhrnných údajů z průběžné evidence“, který je následně předmětem analýz a kontrol při tvorbě PDISOH. Základní principy evidence lze shrnout do následujících bodů:

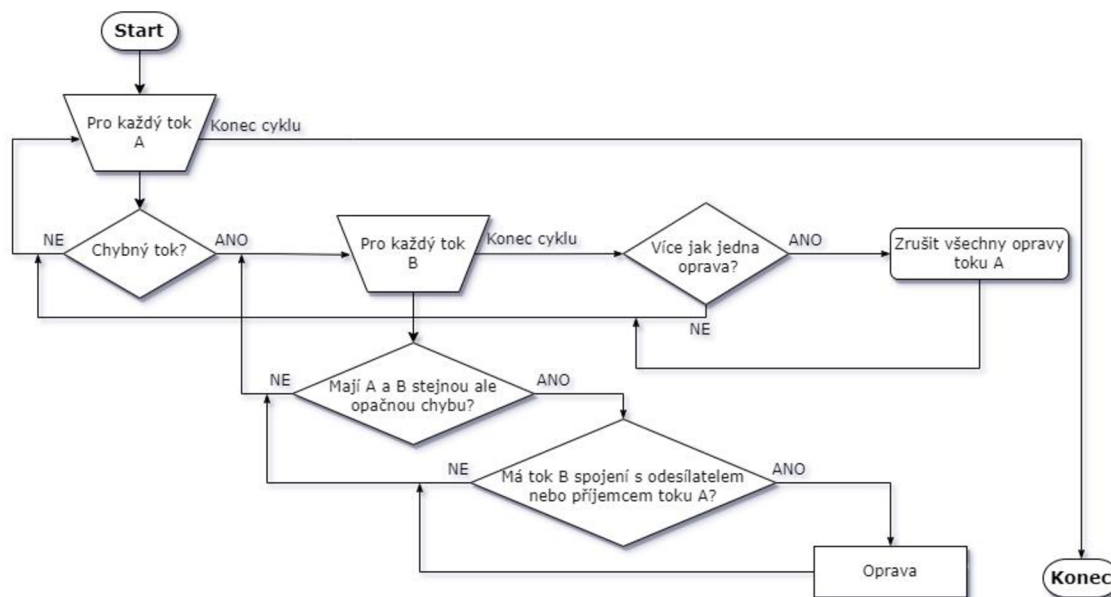
- Kódy nakládání jsou rozděleny do kategorií plus (produkce a převzetí) a minus (zpracování a předání).
- První písmeno kódu reprezentuje původ odpadu (A = vlastní odpad, B = cizí odpad, C = odpad z předchozích let).
- Každý záznam v databázi má uvedeného evidentanta a partnera. Partnerem může být také stejná entita jako ohlašovatel (při nakládání bez partnera).

- Hmotnostní bilance musí být pro každý subjekt systému rovna 0 (odpad na vstupu musí být roven odpadu na výstupu).
- Množství evidovaného odpadu při předání si musí odpovídat v rámci výkazů obou subjektů (příjemce a odesílatel).

Jak ukazují předběžné analýzy, tak evidované hodnoty často obsahují řadu chyb. Zejména se jedná o hmotností nesoulady napříč všemi úrovněmi nebo v rámci transportu odpadu jsou chybně ohlášení partneri nakládání. Následné vyhodnocení takových dat bez řádné analýzy a rekonstrukce může vyústit v nepřesnosti v rámci strategického plánování.

### 3.1.2 Pre-processing dat a oprava zjevných chyb

Hlavním aparátem pro opravu chyb a celkovou rekonstrukci je vyrovnání dat, před kterým je však nutné provést analýzu databáze, vyhodnotit chybovost subjektů a připravit vstupní parametry pro výpočet. Zároveň však může být přínosné využít algoritmické opravy chyb, které je možné identifikovat na základě opakujících se výskytů. Zde se jedná především o problematiku přepravy odpadu mezi jednotlivými subjekty. V rámci této interakce jeden subjekt eviduje předání odpadu a druhý subjekt převzetí odpadu. V případě korektních hlášení se množství u těchto záznamů bude rovnat, avšak často jsou hodnoty v rozporu či hlášení jedné strany zcela chybí. V rámci vývoje však byly identifikovány případy, kdy jedna strana uvádí špatného partnera. Tato situace v praxi může nastat v případě, kdy komunikace a fakturace je prováděna na sídlo firmy, avšak odpad je ve skutečnosti předán pouze na pobočku. Tyto chyby je možné odstranit pomocí opravy založené na algoritmu na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma popisující algoritmus opravy chybných toků.

Princip korekce je založen na systematické analýze všech zaznamenaných toků, které jsou mezi sebou porovnávány. Pro provedení korekce musí mít oba toky stejnou množství chybu, ale v opačného významu (pokud bylo převzato více odpadu, je hledán tok, kde bylo předáno méně odpadu) a oba toky musí spojit stejný subjekt. Pokud existuje více než jedna možná korekce, chyba je ponechána pro vyrovnání dat. Podmínky této opravy lze také upravit, kdy je povolena určitá tolerance na množství odpadu. Princip je také možné využít pro kombinaci vícero toků, kdy je korekce realizována pomocí několika toků B, jejichž součet chyb je roven chybě toku A.

Výhodou této opravy je, že tyto korekce nijak nezasahují do bilance v uzlech a jsou pouze vhodným způsobem přeměrovány toky mezi subjekty. To dále podporuje i fakt, že se ve své podstatě jedná o implementaci nejmenší možné odchylky (tok je nutné vyrovnat a je provedeno bez zásahů do produkce či zpracování) a navržená metoda vyrovnání dat (viz kapitola 3.1.3) by tyto chyby měla korektně opravit. Nicméně je vhodné tyto chyby identifikovat přednostně a snížit tak počet stupňů volnosti, zejména pak v případě aplikace na data s agregací subjektů, kde může docházet k předání v rámci jednoho uzlu a vyrovnání dat není schopno tento tok správně vyhodnotit (jedná se o vstup i výstup do uzlu, víceznačné řešení). Zároveň se také jedná o jedinou část oprav, na které je možné funkci vyrovnání dat kontrolovat.

### 3.1.3 Vyrovnání dat

Oprava chyb v pre-processingu může vyřešit řadu hmotnostních nesouladů. Lze však očekávat, že v systému budou stále přítomny další chyby. Tyto neopravené hmotnostní nesoulady musí být řešeny pomocí sofistikované metody, která zohledňuje všechny vazby mezi jednotlivými subjekty a hledá nejpravděpodobnější řešení. Na základě tohoto principu je možné využít matematický přístup na principu vyrovnání dat, který díky implementaci co nejmenších možných odchylek k evidovaným hodnotám zajistí všechny podmínky definované pro systém. Opravená databáze tak díky tomuto přístupu nebude příliš odlišná od původních hlášení a následné vyhodnocení dat nebude těmito zásahy příliš ovlivněno. Naopak, díky tomuto přístupu lze získat větší vhled do dat, jelikož je možné rekonstruovat chybějící hlášení či získat podněty pro kontrolní hlášení významných odpadových proudů.

Matematický model pro vyrovnání dat je založen na uzlech a orientovaných hranách. Kvůli velkému počtu možných hran mezi všemi uzly jsou modelovány pouze ty hrany mezi dvěma subjekty, které vykazují jednostrannou nebo vzájemnou interakci (tj. na hraně je evidované buď předání nebo převzetí, případně obě). Díky tomu mohou být významně sníženy paměťové nároky a čas pro výpočet. Zároveň však vnáší do úlohy předpoklad, že mohou být pouze modifikovány existující toky a nemůže vzniknout nový. Obecný matematický aparát vyrovnání dat je ve většině případů doplněn o kovarianční matici (tzv. váhy), které reprezentují důvěryhodnost daného subjektu či měření. V oblasti procesního inženýrství jsou většinou využívány vlastnosti měřících zařízení, případně odhadnuté rozptyly z naměřených hodnot. V případě databáze OH není však možné tento princip využít, jelikož je k dispozici pouze jeden záznam (tj. měření) bez doplňujících informací, které by mohly reflektovat důvěryhodnost subjektu. Je tak nutné definovat váhy na základě expertních odhadů a logických pravidel (viz kapitola 3.1.4) vyplývajících přímo z dat. Obecně je také smysluplné zvážit hodnoty mimo hlavní diagonálu, které by mohly představovat řetězení chyb způsobené vzájemným ovlivňováním, například společnosti zajišťující svoz odpadů, které obvykle poskytují konečné hodnoty pro hlášení jednotlivým subjektům.

V následující sekci bude představen matematický model pro vyrovnání dat, který je koncipován jako lineární model. Takový model má výhodné vlastnosti pro optimalizaci z hlediska řešitelnosti a nalezení globálního optima. Navíc lineární závislost implementovaných odchylek v účelové funkci vede k výběru mediánu. To je založeno na předpokladu, že spolehlivějším a konzistentnějším subjektům v systému lze více věřit a jejich hlášení tak modifikovat s menší mírou. Tato vlastnost je žádoucí, protože se předpokládá, že ve většině případů bude záznam správný. Výsledek vyrovnání dat tedy spočívá především ve výběru správných hodnot, nikoli jejich průměrování, jak je tomu v případě kvadratické závislosti. Nejprve je uveden seznam použitých symbolů.

## Množiny

$a \in A$  množina hran reprezentující toky mezi subjekty  
 $i \in I$  množina uzlů v databázi reprezentující jednotlivé subjekty

## Parametry

$F_a^+$  evidované množství odpadu převzaté po hraně  $a$ , [kg]  
 $F_a^-$  evidované množství odpadu odeslané po hraně  $a$ , [kg]  
 $M_{a,i}$  incidenční matice popisující vstupní a výstupní uzel všech hran, [-]  
 $P_i$  evidované množství produkce odpadu v uzlu  $i$ , [kg]  
 $T_i$  evidované množství zpracovaného odpadu v uzlu  $i$ , [kg]  
 $w_i^P$  váha pro produkci odpadu v uzlu  $i$ , [-]  
 $w_i^T$  váha pro zpracování odpadu v uzlu  $i$ , [-]

## Proměnné

$\gamma_a^{F+}$  implementovaná odchylka k množství přijatého odpadu po hraně  $a$ , [kg]  
 $\gamma_a^{F+}, \gamma_a^{F-}$  rozdělení odchylky na kladnou a zápornou část (přijatý odpad), [kg]  
 $\gamma_a^{F-}$  implementovaná odchylka k množství odeslaného odpadu po hraně  $a$ , [kg]  
 $\gamma_a^{F+}, \gamma_a^{F-}$  rozdělení odchylky na kladnou a zápornou část (odeslaný odpad), [kg]  
 $\gamma_i^P$  implementovaná odchylka k množství vyprodukovaného odpadu v uzlu  $i$ , [kg]  
 $\gamma_i^{P+}, \gamma_i^{P-}$  rozdělení odchylky na kladnou a zápornou část (produkce odpadu), [kg]  
 $\gamma_i^T$  implementovaná odchylka k množství zpracovaného odpadu v uzlu  $i$ , [kg]  
 $\gamma_i^{T+}, \gamma_i^{T-}$  rozdělení odchylky na kladnou a zápornou část (zpracování odpadu), [kg]

Účelová funkce optimalizačního modelu v rovnici (3.1) je rovna součtu všech vnesených odchylek tak, aby byly splněny hmotnostní bilance a vazby v systému. Tyto odchylky musí být rozděleny na kladné a záporné části pro jejich správnou implementaci (viz níže popsané rovnice (3.5) a (3.6)). Každý prvek systému má přiřazenou míru důvěry, která je implementována v modelu pomocí vah reprezentujících hodnoty na diagonále kovarianční matice. Cílem je implementovat do databáze minimální odchylky, a proto je tento součet odchylek minimalizován. Zohledněny jsou odchylky pro produkovaný odpad ( $\gamma_i^{P+}, \gamma_i^{P-}$ ) a zpracováváný odpad ( $\gamma_i^{T+}, \gamma_i^{T-}$ ) s odpovídající vahou ( $w_i^P, w_i^T$ ). Implementované odchylky pro transport nejsou v účelové funkci uvažovány, jelikož z dostupných dat a při současné konstrukci modelu nebylo nalezeno kritérium, které by bylo navázané na tok odpadu a nebylo výsledkem již zahrnutých informací týkajících se bilance uzlů. Výsledkem je tedy řešení, které nejméně modifikuje produkci a zpracování bez ohledu na počet změn v tocích. Model je však svázán pouze existujícími toky s pevně danou hranicí maximální opravy (viz rovnice (3.12)) a nemůže tedy vytvářet nové hrany, kterými by mohla být dosažena hodnota účelové funkce 0.

$$\min \left( \sum_{i \in I} w_i^P (\gamma_i^{P+} + \gamma_i^{P-}) + \sum_{i \in I} w_i^T (\gamma_i^{T+} + \gamma_i^{T-}) \right). \quad (3.1)$$

Následující část modelu popisuje potřebná omezení pro optimalizační model vymezující množinu přípustných řešení. Rovnice (3.2) popisuje rovnost mezi převzatým a předaným odpadem na všech hranách. Ohlášené množství převzatého odpadu  $F_a^+$  včetně odhadnuté odchylky  $\gamma_a^{F+}$  musí být rovno ohlášenému množství předaného odpadu  $F_a^-$  s odhadnutou odchylkou  $\gamma_a^{F-}$ .

$$F_a^+ + \gamma_a^{F+} = F_a^- + \gamma_a^{F-}, \quad \forall a \in A. \quad (3.2)$$

Rovnice (3.3) popisuje hmotnostní bilanci v rámci jednoho uzlu (např. subjekt, Základní územní jednotka (ZÚJ)). Rozdíl produkce  $P_i$  (s odpovídající odchylkou  $\gamma_i^P$ ) a zpracovaného odpadu  $T_i$  (s odchylkou  $\gamma_i^T$ ) včetně přepravy odpadu  $M_{a,i}(F_a^+ + \gamma_a^{F+})$  musí být roven nule. Incidenční matice  $M_{a,i}$  poskytuje potřebné informace o tom, které hrany vstupují do daného uzlu a které z něj vycházejí. Součet všech hran násobený maticí incidence představuje celkovou hmotnostní bilanci přepravy odpadu uzlu.

$$P_i + \gamma_i^P - T_i - \gamma_i^T + \sum_{a \in A} M_{a,i}(F_a^+ + \gamma_a^{F+}) = 0, \quad \forall i \in I. \quad (3.3)$$

Rovnice (3.4) představuje hmotnostní bilanci v rámci celého systému. Veškerý vyprodukovaný odpad musí být zpracován včetně implementovaných odchylek. Toto omezení vyplývá ze splnění předchozích dvou omezení, pro úplnost je zde však uvedeno.

$$\sum_{i \in I} (P_i + \gamma_i^P) = \sum_{i \in I} (T_i + \gamma_i^T). \quad (3.4)$$

Odchylka k jednotlivým záznamům může nabývat libovolné hodnoty a záporné hodnoty by při minimalizaci vyústily k nižší hodnotě účelové funkce. Proto je nutné uvažovat jejich absolutní hodnotu, která však z pohledu optimalizačních algoritmů představuje obtížný problém (nedefinována derivace v bodě, skoková změna). Tento problém lze však vyřešit rozdělením odchylek na kladné a záporné části, jak je popsáno v rovnicích (3.5) a (3.6). Zároveň je nutné zajistit, aby tyto proměnné byly nezáporné (viz rovnice (3.7) a (3.8)).

$$\gamma_a^{F+} = \gamma_a^{F+} - \gamma_a^{F-}, \quad \gamma_a^{F-} = \gamma_a^{F+} - \gamma_a^{F-}, \quad \forall a \in A, \quad (3.5)$$

$$\gamma_i^P = \gamma_i^{P+} - \gamma_i^{P-}, \quad \gamma_i^T = \gamma_i^{T+} - \gamma_i^{T-}, \quad \forall i \in I, \quad (3.6)$$

$$\gamma_a^{F+}, \gamma_a^{F-}, \gamma_a^{F+}, \gamma_a^{F-} \geq 0, \quad \forall a \in A, \quad (3.7)$$

$$\gamma_i^{P+}, \gamma_i^{P-}, \gamma_i^{T+}, \gamma_i^{T-} \geq 0, \quad \forall i \in I. \quad (3.8)$$

Pro zachování smysluplnosti řešeného problému nesmí dojít k situaci, kdy odchylka způsobí záporný tok, produkci nebo zpracování odpadu. Z tohoto důvodu jsou definovány rovnice (3.9)-(3.11).

$$F_a^+ + \gamma_a^{F+} \geq 0, \quad \forall a \in A, \quad (3.9)$$

$$P_i + \gamma_i^P \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad (3.10)$$

$$T_i + \gamma_i^T \geq 0, \quad \forall i \in I. \quad (3.11)$$

Jako další podmínku pro vyrovnání dat je vhodné definovat omezení, které zajistí, že hmotnostní tok na hraně bude vždy mezi evidovanými hodnotami. Zároveň toto omezení zajistí, že v případech, kdy se evidované hodnoty u předání a převzetí rovnají, nebudou hodnoty modifikovány. Omezení je implementováno pomocí rovnice (3.12), kde velikost rozdílu mezi výkazy na daném toku v absolutní hodnotě musí být rovna součtu vnesených odchylek k danému toku.

$$|F_a^+ - F_a^-| = \gamma_a^{F+} + \gamma_a^{F-} + \gamma_a^{F+} + \gamma_a^{F-}, \quad \forall a \in A. \quad (3.12)$$

Následující rovnice (3.13) až (3.16) jsou volitelné, ale doporučuje se použít alespoň jednu definovanou variantu s přihlédnutím k expertním odhadům k vybranému odpadovému proudu. Současně lze však zvolit maximálně jednu, jinak je pravděpodobné, že optimalizační úloha nebude řešitelná. Následuje popis jednotlivých variant:

- Rovnice (3.13) a (3.14): Jedním z cílů optimalizačního modelu je vyrovnání celkové produkce a zpracování v systému. Nicméně vnesené odchylky mohou snížit evidované hodnoty a celkově tak snížit množství odpadu. Lze však předpokládat, že údaje o produkci či zpracování odpadu v evidenci spíše chybí, než že by přebývaly, případně byly uvedeny duplicitně. Proto se jako logické řešení jeví postup, kdy výsledná produkce či zpracování bude větší nebo rovno většímu z obou hodnot. Současné zohlednění rovnic (3.13) a (3.14) zajistí, že nižší hodnota (produkce nebo zpracování) bude alespoň rovna druhé hlášené hodnotě. Toto omezení však neovlivňuje jednotlivé entity.
- Rovnice (3.15): Použitím této rovnice je možné nastavit maximální důvěryhodnost na ohlášenou produkci. Omezení tak představuje zákaz modifikovat produkci v jakýchkoliv subjektech a model pouze upravuje množství zpracování.
- Rovnice (3.16): Použitím této rovnice je možné nastavit maximální důvěryhodnost pro ohlášené zpracování. Omezení tak představuje zákaz modifikovat zpracování v jakýchkoliv subjektech a model pouze upravuje množství produkce.

$$\sum_{i \in I} (P_i + \gamma_i^P) \geq \sum_{i \in I} P_i, \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in I} (T_i + \gamma_i^T) \geq \sum_{i \in I} T_i, \quad (3.14)$$

$$\gamma_i^P = 0, \quad \forall i \in I, \quad (3.15)$$

$$\gamma_i^T = 0, \quad \forall i \in I. \quad (3.16)$$

### 3.1.4 Definice vah

Váhy v matematickém modelu pro vyrovnání dat představují klíčový vstup, na základě kterého jsou vnášeny odchylky k jednotlivým hlášením. Tyto váhy musí být definovány s využitím odborných odhadů, jelikož v případě evidence OH je k dispozici vždy pouze jeden záznam a není možné předpokládat žádnou formu ověření záznamů nebo dodatečných měření. Váhy jsou definovány na základě zjištěných rozdílů a neplnění základních principů evidence, které dále určují míru důvěryhodnosti pro každý subjekt v systému. Cílem při definici vah je zajistit, aby byly primárně modifikovány ty subjekty, které jsou chybné namísto rozložení chyb mezi všechny v systému, které by mělo být realizováno až v nejkrajnějším případě. S ohledem na účelovou funkci jsou váhy konstruovány tak, aby větší hodnota odpovídala důvěryhodnějšímu subjektu a subjekty s nižší hodnotou váhy byly modifikovány s větší pravděpodobností.

Většina vzorců je uvedena pro váhy související s produkcí odpadu a pokud není uvedeno jinak, jsou vzorce využívány i pro případ zpracování. Cílem je zachovat váhy mezi nulou a jedničkou, přičemž jen nutné vynechat hodnotu 0, která by mohla vést k neomezeným odchylkám u vybraného subjektu. Aktuální poznatky získané během vývoje a testování nástroje vedly k následujícím pravidlům, která definují jednotlivé části použité pro finální výpočet vah.

První část modelované váhy souvisí s chybami při evidenci předání a převzetí odpadu. Cílem je implementovat větší odchylky u těch subjektů, které vykazují vyšší relativní chybovost v rámci analyzovaných dat, jelikož s větší tendencí nedodrží principy hlášení. Příslušný koeficient je vyjádřen rovnicí (3.17), kde součet chyb na hranách spojených s daným subjektem je dělen průměrem hlášených hodnot. Výsledná hodnota je odečtena od jedničky a v případě, kdy nedochází k přijetí nebo přepravě odpadu, je hodnota nastavena na jedničku.

$$k_i^{1,P} = \begin{cases} 1, & \text{pro subjekty bez evidované přepravy} \\ \max\left(0, 1; 1 - \frac{\sum_{a \in A} |M_{a,i}(F_a^+ - F_a^-)|}{\sum_{a \in A} |M_{a,i} \frac{F_a^+ + F_a^-}{2}|}\right), & \text{jinak} \end{cases}, \quad \forall i \in I. \quad (3.17)$$

Následující rovnice (3.18) definuje váhu na základě chyby v hmotnostní bilanci v rámci hodnoceného uzlu (subjektu). Celkový hmotnostní nesoulad je dělen součtem produkce a zpracování. Subjekt bez produkce a zpracování může být považován za tranzitní uzel a není žádoucí, aby nesoulady z přepravy odpadu vyústili k jejich změně. Proto je v takovém případě váha nastavena na hodnotu 1. Důvěryhodnost z pohledu bilance v uzlu je také ovlivňována rovnicemi (3.19) a (3.20) v závislosti na tom, zda souvisí s produkcí nebo zpracováním. V případě subjektu, který na vstupu má více odpadu než na výstupu, je žádoucí snížit váhu zpracování, aby model měl větší tendenci navýšit právě hodnotu zpracování, než aby přistoupil k omezování produkce. Stejný princip se používá i v případě záporné bilance, kde je cílem dorovnat změnou produkce evidované zpracování. Je však nezbytné nejprve zvážit všechny ostatní vazby v systému a tyto úvahy by měly být zohledněny až jako poslední krok. Proto je zvolen koeficient 0,9, který nemá významný vliv na výslednou váhu, ale zajišťuje požadovaný princip.

$$k_i^{2,P} = \begin{cases} \max\left(0, 1; 1 - \frac{|P_i + \gamma_i^P - T_i - \gamma_i^T + \sum_{a \in A} M_{a,i}(F_a^+ + \gamma_a^{F+})|}{P_i + T_i}\right), & \text{pro } P_i + T_i > 0 \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}, \quad \forall i \in I. \quad (3.18)$$

$$k_i^{3,P} = \begin{cases} 0,9, & \text{pro hmotnostní bilanci } < 0 \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}, \quad \forall i \in I. \quad (3.19)$$

$$k_i^{3,T} = \begin{cases} 0,9, & \text{pro hmotnostní bilanci } > 0 \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}, \quad \forall i \in I. \quad (3.20)$$

Je možné očekávat, že některé záznamy budou v databázi chybět, kdy extrémním případem je chybějící subjekt, který z nějakého důvodu nepodal hlášení produkci a nakládání s odpadem. Nástroj je schopen tyto subjekty identifikovat, pokud je v databázi s nimi uvedena alespoň jedna interakce. V opačném případě nelze z dostupných dat rekonstruovat chybějící hodnoty, například když subjekt produkuje a zpracovává pouze svůj odpad. Pokud je však subjekt uveden v některém záznamu o předání či převzetí odpadu bez jakékoliv vlastní hlášení, předpokládá se, že subjekt neplní zákonem danou povinnost o evidenci a v rámci vyrovnání dat má nastavenou nízkou důvěryhodnost. Tento princip je zajištěn následující rovnicí (3.21).

$$k_i^{4,P} = \begin{cases} 0,1, & \text{bez vlastní evidence} \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}, \quad \forall i \in I. \quad (3.21)$$

Účelem původního vyrovnání dat v procesním inženýrství je rozdělit odchylky v systému na základě kvalitativních charakteristik. V případě kvadratického tvaru vyrovnání dat je často využívána forma normalizace dat, aby se relativní podíl odchylek přibližně rovnoměrně rozložil mezi všechny subjekty v systému. Tato funkce je výhodná zejména v případech, kdy jsou v systému uzly s velmi rozdílným množstvím odpadu. Pro lineární tvar vyrovnání dat musí být však aplikován aditivní princip namísto multiplikativního. V opačném případě by kvalitativní složka váhy měla pouze zanedbatelný účinek a model by se rozhodoval převážně na základě velikosti subjektu. To je způsobeno lineární závislostí, kde pokud má subjekt menší váhu, je upraven místo toho, aby byly odchylky proporcionálně rozděleny mezi všechny v systému. Pro lineární formu modelu je cílem zahrnout pravidlo, že pokud je nutné vnést odchylku mezi dva subjekty se stejnou (či podobnou) kvalitativní váhou, bude modifikován subjekt s větším množstvím odpadu, jelikož zde jakýkoliv zásah způsobí relativně menší odchylku od evidovaných hodnot. Rovnice (3.22) popisuje výpočet normalizační části váhy, kde odmocnina zajišťuje pomalejší pokles, aby byly zachovány rozdíly v případě nižších hodnot produkce a zpracování. Forma této normalizační části váhy by měla být přizpůsobena vzhledem k produkci odpadu a variabilitě velikosti subjektů v systému. Uvedená podoba váhy je navržena pro případovou studii zaměřenou odpadový proud s produkcí okolo jednoho milionu tun.

$$v_i^P = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{P_i + T_i}}, & \text{pro } P_i + T_i > 100 \\ 0,1 & \text{, jinak} \end{cases}, \quad \forall i \in I. \quad (3.22)$$

Všechny výše uvedené části společně tvoří váhu jak pro produkci, tak i zpracování u každého subjektu. Následující rovnice (3.23) definuje konečný výpočet, kde jsou všechny části kvalitativních charakteristik násobeny dohromady s přičtením normalizační části.

$$w_i^P = k_i^{1,P} k_i^{2,P} k_i^{3,P} k_i^{4,P} + v_i^P, \quad \forall i \in I. \quad (3.23)$$

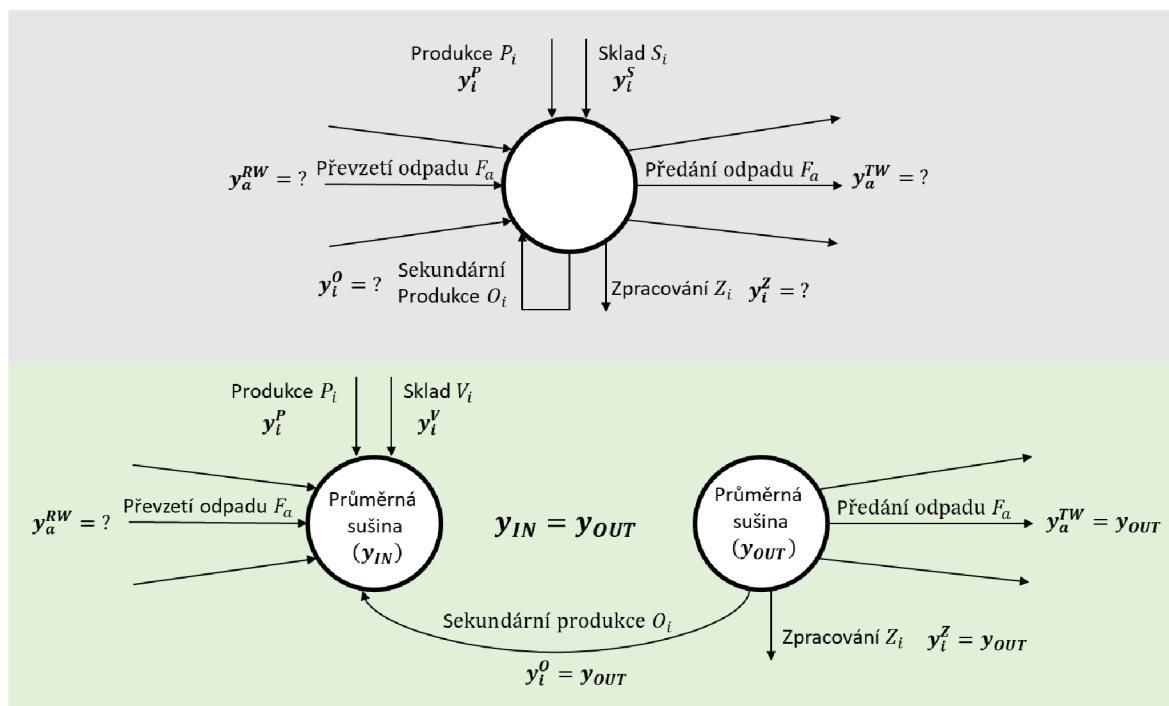
### 3.2 Analýza složení toku odpadu

Pro vyhodnocování indikátorů OH je důležité krom monitorování množství odpadu sledovat také jeho kvalitu. Přínos této informace je především v případě sledování obsahu určité látky v dané směsi. Jako příklad lze konkrétně uvést katalogové číslo odpadu 19 08 05 „Kaly z čištění komunálních odpadních vod“, které jsou evidovány ve zvodnělé formě, tj. většinu hmotnosti tvoří voda. Klíčovou surovinou pro OH je však sušina, která je bohatá na minerály a látky, které mohou být využity zejména v oblasti zemědělství. Údaj o sušině je v takovém případě evidován pouze v místě produkce a skrze řetězec přepravy odpadu je tato informace ztracena. Výsledné indikátory vzhledem k sušině tak není možné vyhodnotit, případně jsou vypočítány z celorepublikového průměru. Takové vyhodnocení však může být značně odlišné od reality a systém může vypadat jako efektivní. K podobnému efektu může docházet u libovolného odpadové proudy, kdy sledovaným kritériem může být například výhřevnost odpadu. Proto aparát pro odhad kvality odpadu může představovat klíčový nástroj při identifikaci neefektivních částí infrastruktury. Problematika bude v následující části prezentována pro případ již zmíněných kalů.



### 3.2.1 Bodový odhad

Jak již bylo nastíněno, v současnosti se indikátory nakládání se sušinou vyhodnocují s využitím celostátního průměru z hodnot evidovaných v místě produkce, který je následně aplikován na všechna zpracování. Toto zjednodušení je používáno zejména kvůli hmotnostním nesouladům a nepřesnostem při evidenci přepravy dopadu v rámci systému. Díky rekonstrukci dat a zajištění hmotnostních bilancí na všech úrovních systému (viz kapitola 3.1) je možné přístup průměrování převést na nižší úroveň jednotlivých mikroregionů či subjektů a tím poskytnout odhad na základě toků odpadu, které jsou navázané přímo na daný uzel. Princip je ilustrován v Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma pro výpočet průměrné sušiny v uzlu.

Jedná se o stejný přístup jako dopsud s tím rozdílem, že je problematika řešena ve větším detailu a průměr je vypočítán v každém uzlu. Takto jsou v konkrétní lokalitě do výsledné sušiny započítány pouze ty kaly, které mají návaznost na daný uzel a je tím eliminováno ovlivnění odpadovými proudy z jiné části ČR. Předpokladem je, že veškerý odpad vstupující do uzlu je ideálně promíchán a až poté zpracován či předán dalšímu subjektu. To umožňuje rozdělení každého subjektu na dvě části, přičemž poměr sušiny mezi jednotlivými částmi se musí rovnat. Poměr sušiny v uzlu tak může být vypočítán jako vážený průměr všech příchozích toků. Dalším předpokladem je, že podíl sušiny v sekundární produkci z předúpravy odpovídá průměru subjektu, jelikož v rámci evidence nejsou k dispozici relevantní informace týkající se jejího obsahu. Úloha je založena na problému toku v síti, kde množství zvodnělého kalu v systému je vždy známo díky vyrovnání dat a zajištění hmotnostních bilancí. Neznámé jsou pouze poměry sušiny v jednotlivých uzlech. Výsledný matematický model pak představuje systém o nula stupních volnosti (pouze jedno řešení) obsahující pouze bilanční rovnici pro množství (podíl) sušiny a výsledek je dán řešením soustavy lineárních rovnic. Následující seznam uvádí označení symbolu využitě pro matematický zápis.

## Množiny

$a \in A$  množina hran  
 $i, j \in I$  množina uzlů

## Parametry

$D_i^P$  procentuální podíl sušiny ve vyprodukovaném kalu v uzlu  $i$  v řešeném roce, [-]  
 $D_i^V$  procentuální podíl sušiny ve skladovaném kalu v uzlu  $i$  z minulého roku, [-]  
 $F_a$  množství zvodnělého kalu transportovaného po hraně  $a$ , [kg]  
 $M_{a,i}^{IN}$  incidenční matice pro toky  $a$  vstupující do uzlu  $i$ , [-]  
 $M_{a,i}^{OUT}$  incidenční matice pro toky  $a$  vystupující z uzlu  $i$ , [-]  
 $P_i$  primární produkce zvodnělého kalu v uzlu  $i$  v řešeném roce, [kg]  
 $O_i$  sekundární produkce zvodnělého kalu v uzlu  $i$  v řešeném roce, [kg]  
 $V_i$  množství zvodnělého kalu na skladě v uzlu  $i$  z minulého roku, [kg]

## Proměnné

$y_i$  průměrný procentuální podíl sušiny ve zvodnělém kalu v uzlu  $i$ , [-]

K výpočtu hledaných procentuálních podílů sušiny je třeba zajistit hmotnostní bilanci v uzlech pro sušinu. Následující rovnice (3.24) popisuje vážený průměr vstupních toků vzhledem k podílu sušiny. Levá strana rovnice obsahuje množství sušiny ve primárně vyprodukovaném kalu  $P_i D_i^P$ , sušinu v kalu z minulého roku  $V_i D_i^V$ , sušinu v sekundární produkci  $O_i y_i$  a sušinu v převzatém zvodnělém kalu. Pravá strana rovnice se skládá z celkového množství zvodnělého kalu na vstupu vynásobeného průměrným procentuálním podílem sušiny  $y_i$ . Vzhledem k tomu, že jsou splněny hmotnostní bilance díky vyrovnaní dat, není nutné ve výpočtu uvažovat zpracování a předání, jejichž výskyt na pravé straně by představoval ekvivalentní zápis. Výsledná hodnota  $y_i$  je následně aplikována na zpracování zvodnělých kalů pro získání odpovídajícího množství sušiny.

$$\begin{aligned} P_i D_i^P + V_i D_i^V + O_i y_i + \sum_{a \in A} \left( M_{a,i}^{IN} F_a \sum_{j \in I} (M_{a,j}^{OUT} y_j) \right) \\ = y_i \left( P_i + V_i + O_i + \sum_{a \in A} (M_{a,i}^{IN} F_a) \right), \quad \forall i \in I. \end{aligned} \quad (3.24)$$

### 3.2.2 Intervalový odhad

Přístup prezentovaný v předchozí kapitole poskytuje pouze bodový odhad. Při vyhodnocování systému a dílčích regionů či subjektů může být užitečné mít informace i o variabilitě tohoto odhadu a zkonstruovat příslušné intervalové odhady. Vzhledem k tomu, že nejsou k dispozici žádné informace o směrodatné odchylce, konstrukce intervalových odhadů je realizována prostřednictvím optimalizačního výpočtu, který určuje meze přípustného podílu sušiny ve zvodnělých kalech. Použití termínu intervalový odhad tak lze spíše považovat za přípustné hranice obsahu sušiny.

Výpočet je založen na problému toku v síti s více komoditami, kde každý producent odpadu produkuje svůj vlastní typ odpadu. Minimalizaci nebo maximalizaci podílu sušiny ve vybraném uzlu tak lze získat příslušné limity. Tato konstrukce je však výpočetně náročná, zejména co se týče paměťových nároků. Zároveň je nutné provést výpočty pro velké množství scénářů, které odpovídá dvojnásobku počtu subjektů s evidovaným zpracováním, avšak výpočty je možné realizovat paralelně. Pro zachování linearit bylo nutné sekundární produkci navázat na republikový průměr, ale z hlediska celkového množství zkoumaného

odpadu se jedná o zanedbatelný zásah. Tím také bylo možné použít přehlednější notaci pro různé zdroje produkce odpadu, které jsou zde již indexovány ve srovnání s výpočtem bodového odhadu. Výčet matematického značení je následující:

### Množiny

$a \in A$  množina hran  
 $i, j \in I$  množina uzlů  
 $n \in N$  množina zdrojů odpadu

### Parametry

$D_{j,n}$  procentuální podíl sušiny ve zvodněném kalu v uzlu  $j$  a zdroje  $n$ , [-]  
 $F_a$  množství transportovaného zvodnělého kalu po hraně  $a$ , [kg]  
 $M_{a,i}$  incidenční matice určující vstupní a výstupní hrany ke všem uzlům, [-]  
 $P_{i,j,n}$  množství zvodnělého kalu produkovaném v uzlu  $i$  ( $i = j$ ) a zdroje  $n$ , [kg]  
 $T_i$  množství zvodnělého kalu zpracovaného v uzlu  $i$ , [kg]

### Proměnné

$t_{i,j,n}$  množství zvodnělého kalu od producenta  $j$  ze zdroje  $n$  zpracovaného v uzlu  $i$ , [kg]  
 $x_{a,j,n}$  množství transportovaného zvodnělého kalu po hraně  $a$  od producenta  $j$  ze zdroje  $n$ , [kg]  
 $y_i$  procentuální podíl sušiny ve zvodněném kalu v uzlu  $i$ , [-]

Účelová funkce v rovnici (3.25) je definována procentuálním podílem sušiny ve zvodněném kalu ve zkoumaném uzlu. Procentuální podíl sušiny je minimalizován nebo maximalizován za účelem dosažení požadovaných mezí.

$$\min y_i \text{ or } \max y_i \quad (3.25)$$

Následující omezení rovnice (3.26) představuje maximální možný tok po hraně, jehož kapacita  $F_a$  je definována výsledky z vyrovnání dat. Jelikož vyrovnání dat zajistilo hmotnostní bilance na všech úrovních systému, je možné definovat podmínku, kdy veškeré odpady od všech producentů a různých zdrojů produkce musí zaplnit dostupné kapacity. Ve výsledku jsou tak přípustná řešení realistická a nemůže dojít k alokaci odpadu u řešeného uzlu, pokud za něj neexistuje odpovídající náhrada pro splnění kapacitních omezení.

$$\sum_{j \in I} \sum_{n \in N} x_{a,j,n} = F_a, \quad \forall a \in A. \quad (3.26)$$

Rovnice (3.27) popisuje hmotnostní bilanci pro odpad od každého subjektu v systému. Produkce  $P_{i,j,n}$  společně se součtem převzatého a předaného odpadu  $M_{a,i}x_{a,j,n}$  musí být rovna zpracování  $t_{i,j,n}$ . Součet zpracovaného odpadu od různých producentů musí být roven celkovému zpracování v uzlu  $T_i$ , jehož výše je získána pomocí vyrovnání dat v předchozím kroku. Tato podmínka je definována rovnicí (3.28).

$$P_{i,j,n} + \sum_{a \in A} M_{a,i}x_{a,j,n} - t_{i,j,n} = 0, \quad \forall i \in I. \quad (3.27)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{n \in N} t_{i,j,n} = T_i, \quad \forall i \in I. \quad (3.28)$$

Procentuální obsah sušiny zpracovaného zvodnělého kalu je vypočítán pomocí rovnice (3.29). Součet veškeré sušiny na vstupu  $D_{j,n}t_{i,j,n}$  vydělený množstvím zpracovaného zvodnělého kalu  $T_i$  je roven hledané procentní hodnotě podílu sušiny v uzlu.

$$T_i y_i = \sum_{j \in I} \sum_{n \in N} D_{j,n} t_{i,j,n}, \quad \forall i \in I. \quad (3.29)$$

Poslední podmínkou pro model je nezápornost proměnných, která je vyjádřena rovnicemi (3.30) a (3.31). Tato dvě omezení rovněž zajišťují nezápornost proměnné  $y_i$ .

$$t_{i,j,n} \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in I, \forall n \in N. \quad (3.30)$$

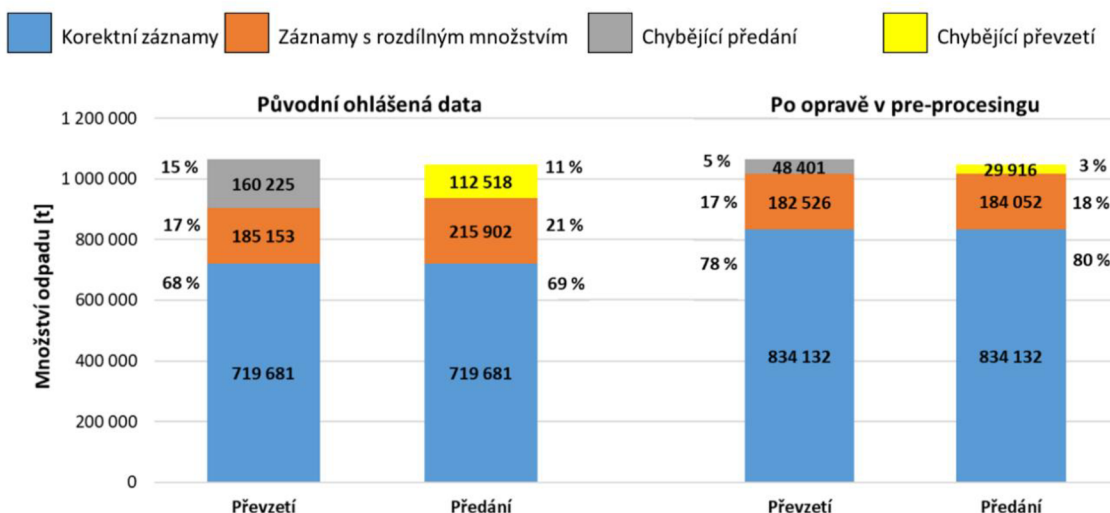
$$x_{a,j,n} \geq 0, \quad \forall a \in A, \forall j \in I, \forall n \in N. \quad (3.31)$$

### 3.3 Vyhodnocení aplikace na případovou studii

Verifikace představeného přístupu ke správě dat v OH včetně vyhodnocení materiálového toku je realizována na případové studii z ČR. Cílem je vyhodnotit zpracování sušiny v kalech z čištění odpadních vod, které podle odpadového katalogu odpovídají číslu 19 08 05. Jak již bylo uvedeno, v ČR je produkce a zpracování kalu z odpadních vod evidována pouze ve formě zvodnělého kalu a podíl sušiny je znám pouze v místě produkce. Kal z odpadních vod lze charakterizovat jako vedlejší produkt při čištění odpadních vod obsahující významné živiny, jako jsou dusík a fosfor [B102]. Jako zdroj dat pro verifikaci je využívána databáze ISOH [B13], přičemž data nejsou veřejně dostupná. Díky výzkumné spolupráci s agenturou CENIA [B99] v rámci projektu CEVOOH [A6] však byla pro vývoj poskytnut výsek ohlášených dat v anonymizované formě. Detail poskytnutých dat odpovídá nejnížší samosprávné jednotce, kterými jsou jednotlivá ZÚJ. V případě zkoumaných kalů z čištění odpadních vod existuje přibližně 1 500 ZÚJ, které lze dále rozdělit na subjekty na základě právní klasifikace (obec, firma, občan). Text je zpracován na základě spolupráce s CENIA, která poskytla výsledky a závěry týkající se analýzy jednotlivých subjektů. Na základě této spolupráce vznikla také již zmiňovaná publikace v odborném časopise [A8].

Jako první krok je realizován pre-processing dat, který má za cíl identifikovat chyby v systému a poskytnout základní statistiky o analyzovaném systému. Celkově je na základě dat evidována produkce ve výši 954 kt, zatímco ohlášené zpracování činilo 971 kt. Rozdíl mezi hodnotami je způsobený hmotnostními nesoulady v systému. Celkově je tak zpracováno 17 kt odpadu, který nemá jasně definovaný původ (neexistuje produkce). Na první pohled lze uvedenou odchylku akceptovat (přibližně 2 %), ale při podrobnějším zkoumání na úrovni jednotlivých typů subjektů se objevují významné chyby. Často jsou zaznamenány pouze informace o produkci a chybí následné údaje o nakládání. Některé subjekty v systému chybí úplně, přestože existují záznamy, které potvrzují jejich účast při nakládání s kaly. Největší chybovost byla však identifikována v případě přepravy odpadu.

V případě analýzy předání a převzetí odpadu lze rozlišovat čtyři kategorie. První skupinou je případ, kdy záznam o předání eviduje stejné množství jako záznam o převzetí a obě strany transakcí mohou být správně spojeny na základě informací „Evident“ a „Partner“. Tato skupina představuje jediný správný způsob hlášení nakládání s odpadem. Další kategorie se týká přepravy, kdy lze sice záznamy propojit, ale nahlášená množství na obou stranách se neshodují. Nejproblematictější kategorie se týká absence jednoho ze záznamů, kdy jedna strana eviduje přepravu odpadu, zatímco druhá strana nikoli. Tento případ lze rozdělit na dvě varianty, buď je evidován pouze záznam o převzetí, nebo pouze o předání. Výsledná analýza je graficky znázorněna na Obr. 3.4. Hodnoty jsou prezentovány jak z pohledu původní databáze bez úprav, tak i následně po korekcích popsanych v rámci pre-processingu.

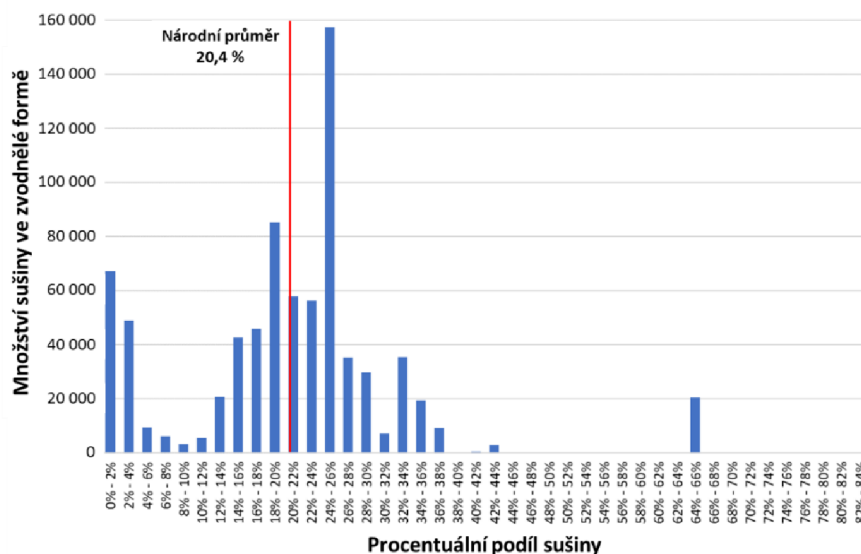


Obr. 3.4: Analýza transportu kalů a identifikace hmotnostních nesouladů včetně oprav zjevných chyb v pre-processingu.

Z analýzy transportu odpadu je patrné, že u více než 30 % z celkového množství přepravovaného odpadu dochází k chybným hlášením. Navíc jednu třetinu těchto chyb představuje případ, kdy existuje pouze jeden záznam a vzhledem k rozdílu mezi celkovým předáním a převzetím nelze předpokládat, že všechny tyto chyby bude možné vhodnými zásahy párovat mezi sebou. Skupina, v rámci které je možné vytvořit dvojice záznamů dle evidentů a partnerů, ale evidované množství se neshoduje, představuje zhruba 20 %. I když je možné, že odpad během přepravy změnil své vlastnosti (například odpařování vody), tak v mnoha případech se jedná o řádovou změnu (jednotky vs. tisíce) tun, což by následně mohlo vést k nereálným číslům vyšším než 100 % z hlediska monitorování sušiny.

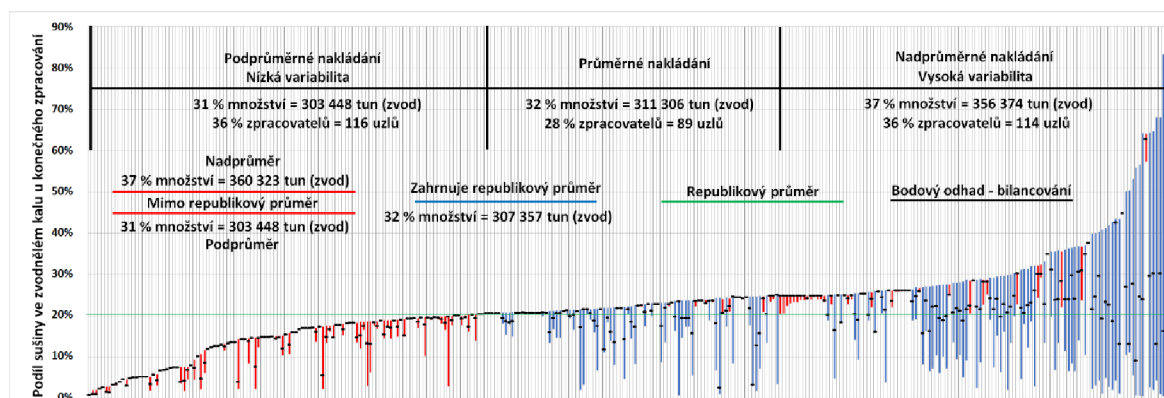
Pre-processing dat umožňuje před samotným vyrovnáním dat opravit řadu chyb zejména tím, že výrazně pomáhá při párování transakcí, které měly uvedeného špatného partnera v původní databázi. Tímto přístupem mohou být také opraveny chyby, které jsou ve skupině spárovaných dvojic s odlišným množstvím (oranžová skupina v Obr. 3.4). Je třeba opět zdůraznit, že všechny korekce provedené během pre-processingu nemění produkci ani zpracování v uzlech a změny v datech jsou realizovány pouze správným přesměrováním toků (vhodná změna partnera záznamu o předání či převzetí). Všechny zbývající chyby v systému jsou ponechány na vyrovnání dat, které již zajistí splnění všech ostatních hmotnostních bilancí a s tím i rovnost produkce a zpracování v celém systému. Manuální ověření oprav a zásahů do systému však není realizovatelné pro všechny případy chyb. Existují nesrovnalosti, které ani z expertního odhadu není možné posoudit správně, zejména pak v případech, kdy může docházet k řetězení chyb mezi subjekty a je nutné tak posuzovat systém jako celek. Chyby, které lze vyřešit při pre-processingu, jsou ve většině případů opraveny totožně jako s využitím vyrovnání dat. Výjimkou je zde případ, kdy stejný subjekt eviduje předání odpadu sám sobě.

Jak již bylo zmíněno, v ČR se vyhodnocení zpracování sušiny v kalech opírá o celorepublikový průměr, aniž by byly brány v úvahu pouze přípustné toky odpadu s různou kvalitou. Aby byl tento přístup považován za přijatelný (tj. odchylky od reality nebudou významné), histogram musí kopírovat normální rozdělení s co nejmenší variabilitou. Pro ověření tohoto přístupu jsou analyzovány jednotlivé produkce kalů, které jsou rozděleny dle podílu sušiny. Výsledný graf je znázorněn na Obr. 3.5.



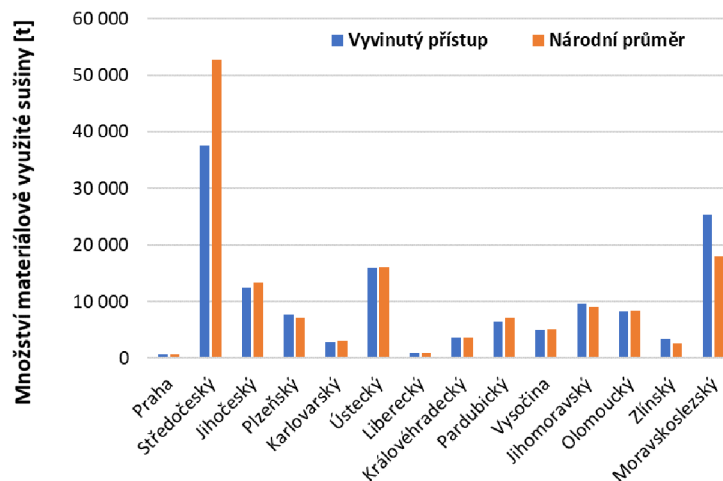
Obr. 3.5: Rozdělení kalů ve zvodnělé formě dle evidovaného podílu sušiny.

Z grafu je patrné, že variabilita podílu sušiny v kalech v místě produkce je značná a data se přibližně řídí bimodálním (dvouvrcholovým) rozdělením s průměrem mezi vrcholy. V takovém případě může výpočet indikátorů nakládání založený na celostátním průměru sušiny být zavádějící, neboť finální zpracování na mikroregionální úrovni může být ovlivněno kaly s odlišným poměrem sušiny, než je vypočítaný průměr. V tomto ohledu je vhodné zmínit extrémní hodnoty s téměř nulovou sušinou a podílem přibližně 65 %. Nově vyvinutý přístup má zde tedy své ospravedlnění. Podíly sušiny v místech konečného zpracování získané výpočtem je znázorněn na Obr. 3.6, kde jsou zobrazeny jednotlivé subjekty včetně porovnání s republikovým průměrem.

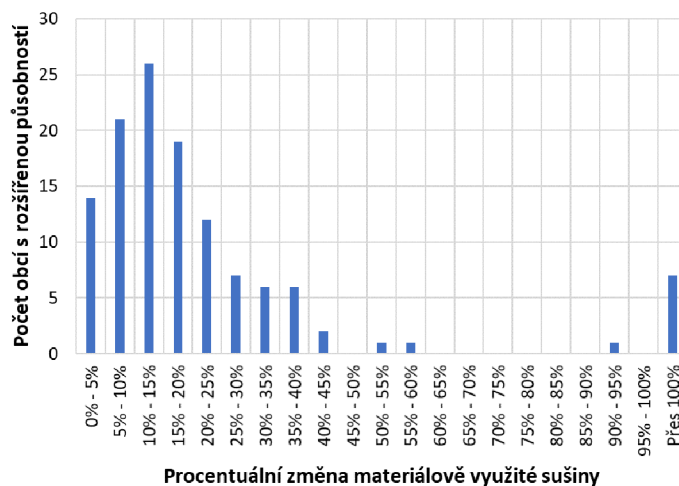


Obr. 3.6: Grafické znázornění výpočtu sušiny v kalech pro evidenty s konečným zpracováním.

Pouze třetina evidovaných zpracování v rámci přípustných mezí (intervalového odhadu) zahrnuje také celostátní průměr sušiny. Nový přístup, který využívá průměrování odpadu u jednotlivých subjektů, vždy poskytuje přípustné řešení, zatímco celostátní průměr je přijatelný pouze v případech vysoké variability. Toto může být způsobeno zejména v situaci, kdy subjekt představuje tranzitní uzel s velkým množstvím odpadu, ale pouze minimální část zpracovává, jenž může obsahovat extrémní podíl sušiny. Závěry plynoucí z analýz a výsledných odhadů tedy indikují, že uvedené přístupy se mohou zásadně lišit při vyhodnocení indikátorů. Analýza pro materiálové využití je graficky znázorněna na Obr. 3.7 a Obr. 3.8.



Obr. 3.7: Porovnání přístupů pro materiálově využitou sušinu v jednotlivých krajích.



Obr. 3.8: Histogram procentuální odchylky materiálové využití v rámci ORP.

Celkové materiálové využití kalů z odpadních vod se v ČR snížilo o 6 %, což lze považovat za významnou změnu v kontextu ambiciózních cílů cirkulární ekonomiky. Tyto rozdíly jsou ještě více patrné na úrovni jednotlivých regionů. Konkrétně Středočeský kraj materiálově využívá sušinu o 30 % méně, zatímco Moravskoslezský kraj ukazuje nárůst o 40 % ve srovnání s celostátním průměrem. Na úrovni mikroregionů lze pozorovat ještě výraznější relativní odchylky, které mohou dokonce přesáhnout 100 %. Tato informace může být klíčem k identifikaci neefektivních oblastí a podpoře při rozvoji potřebné infrastruktury.

### 3.4 Shrnutí a diskuze

Hlavním cílem uvedených dílčích modulů bylo zejména vyvinout aparát, který by umožňoval efektivní správu dat o produkci a nakládání s odpady bez potřeby další administrativní zátěže subjektů v systému. Monitoring dat včetně analýzy jejich kvality je zásadní a jak ukazuje případová studie, v evidovaných datech se vyskytuje řada hmotnostních nesouladů, které následně mohou ovlivnit výstupy z navazujících modelů. Výhodou vyvinutého přístupu je standardizovaná obecná metodika využitá pro korekci dat a následnou možnost vyhodnocovat toky odpadů ve větším detailu. Oproti alokačním

optimalizačním úlohám navíc můžou analýzy založené na evidovaných datech poukázat na specifické chování některých subjektů, které následně může být vhodnými zásahy regulováno.

Z pohledu rekonstrukce dat však nelze očekávat, že výsledky budou přesně identické s tím, co se ve skutečnosti stalo. To však nelze očekávat ani v případě evidovaných dat bez hmotnostních nesouladů. Pro velké společnosti v odvětví OH se ukazuje, že interakce mezi subjekty (předání odpadu) je hlášena v rámci celého území, ale ve skutečnosti odpad s velkou pravděpodobností neopustí daný region, jelikož by takový transport byl velice nákladný. Tato problematika opět naráží na situaci velkých firem s mnoha pobočkami, avšak většina hlášení je vykázána na sídlo firmy. Podobný případ lze pozorovat u sběrných firem, které často sbírají odpad z více obcí najednou a následně ho přerozdělují proporcionálně vzhledem k počtu obyvatel nebo s drobnými úpravami za účelem snížení poplatků za skládkování (množstevní limity pro obce na obyvatele). Rekonstrukce dat by však měla zvýšit vypovídající hodnotu databáze a ve výsledku tak lze očekávat efektivnější plánování OH včetně příčných investic do potřebné infrastruktury.

Odstranění hmotnostních nesouladů na všech úrovních systému zároveň otevřelo možnosti pokročilé analýze toku odpadu včetně jeho složení. Nakládání některých katalogových čísel odpadu je evidováno v jiné formě, než je následné vyhodnocení indikátorů. Zároveň u řady typů zpracování může být výhodné sledovat kvalitu odpadu jako výhřevnost či materiálové složky (např. u plastů PET, HDPE aj.). Příslušné ukazatele jsou následně vyhodnocovány pomocí průměrných hodnot či jsou zcela opomíjeny. To však může vést k nesprávným závěrům a nelze pak poskytnout přesné informace, zejména na mikroregionální úrovni. Vyvinutý přístup umožňuje přesnější posouzení situace a identifikaci konkrétních oblastí, kde značné množství kvalitního odpadu může zůstat nevyužité. Rozdíly mezi výsledky hodnocení ukazatelů jsou patrné na z případové studie v kapitole 3.3, které lze považovat za zanedbatelné v agregované formě za celou ČR, ale na úrovni mikroregionů představují významné odchylky. Je však důležité zdůraznit, že i vyvinutý přístup obsahuje určité zjednodušení. Toky odpadu jsou v uzlech průměrovány, což nedokáže plně zachytit složitost systému a chování v reálných podmínkách.

Vzhledem k uvedeným limitům budou v rámci navazujících výzkumných činností směřovány kroky k minimalizaci zjednodušení a vývoji inovativních přístupů k odhalení celého toku odpadu od producenta až ke zpracovateli. Budoucí vývoj se bude dále zaměřovat na řešení dalších odpadových proudů, které mohou pomoci definovat další podmínky pro kovarianční matici. Jak již bylo zmíněno, určení hodnot i mimo diagonálu může pomoci v odhalení řetězení chyb z důvodu určité spolupráce mezi subjekty. Je nutné najít vhodné kritérium založené na dostupných informacích, které pomůže odhadnout přítomnost vazeb mezi subjekty. Možnosti rozšíření přístupu vyrovnání dat také mohou zahrnovat detailnější hmotnostní bilanci nikoliv na úrovni subjektů, ale další dělení dle počátečních písmen kódů nakládání. Toto rozšíření je klíčové při aplikaci dalších nástrojů, jelikož současným aparátům jsou tyto informace ztraceny. V návaznosti na toto rozšíření bude nutné také modifikovat současnou definici vah, případně realizovat jinou podobu účelové funkce jako kombinaci lineárního a kvadratického programování. S tím je také spojeno testování jednotlivých přístupů ať už na reálných datech či testovacích sadách, u kterých je možné posoudit přesnost oprav. Na druhou stranu testovací sady dat odpovídají spíše modelovým případům a pravděpodobně nedokážou plně postihnout realitu a chování subjektů.



## 4 PODPORA PLÁNOVÁNÍ V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ

S ohledem na nastavené legislativní cíle týkající se zejména navyšování materiálového využití je nutné současný systém OH adekvátně transformovat. Rozsah problematiky a vazby mezi jednotlivými subjekty v systému však vyžadují pokročilé nástroje pro vyhodnocení, optimální návrh a simulace dílčích scénářů, na základě kterých je možné následně realizovat strategické změny v infrastruktuře. Tato kapitola představuje základní kámen této dizertační práce, v rámci které jsou uvedeny nové přístupy matematického programování v oblasti plánování zpracovatelské infrastruktury a návrhu optimálních svozových oblastí a tras. Optimalizační modely jsou postaveny na problematice toku v síti, kde podkladový graf představuje skutečnou dopravní síť. Konkrétně se jedná o kombinaci alokačních a lokačních úloh, jejichž výstupem je optimální umístění nových zařízení ke zpracování odpadu a efektivní alokaci odpadu s ohledem na dopravní vzdálenosti a využívané technologie.

### 4.1 Obecný model

Cílem této kapitoly je definovat obecný model pro optimalizaci toku v síti. Tento model by měl sloužit jako základní stavební kámen, ke kterému mohou být následně přidány další omezení dle potřeb řešeného problému. Základem tokových úloh je správně definovaná dopravní síť, konkrétně lze vybírat mezi normálním a bipartitním grafem. Normální síť představuje propojení pouze nejbližších uzlů, což umožňuje efektivně snižovat výpočetní nároky. Naopak bipartitní síť propojuje přímo producenty a zpracovatele. Tento přístup vede na výrazně větší množství hran, ovšem výsledky poskytují větší vhled do problematiky, kdy je znám celý řetězec toku odpadu. Zároveň bipartitní graf umožňuje zohlednit nelineární náklady na dopravu vzhledem ke vzdálenosti [B103] a také implementovat dodatečné parametry týkající se kvality odpadu, která je známa většinou pouze v místě v produkce.

Z definovaných výzev v kapitole 1.1 a provedené literární rešerše v kapitole 2 je nutné matematický model koncipovat jako vícekriteriální se zohledněním neurčitosti. Z pohledu plánování zpracovatelské infrastruktury lze využít víceúrovňové modely, kde je nutné realizovat strategická rozhodnutí na základě definované neurčitosti v nižších stupních, přičemž nejčastěji je optimalizována jejich střední hodnota. Jelikož odhadovat parametry spojitého rozdělení neurčitých parametrů v OH je velice obtížné a často jsou prognózy ovlivněné expertními odhady, je vhodné neurčitost diskretizovat do několika scénářů. Zohlednění vícero kritérií je možné řešit vhodnými vahami, přičemž je nutné zvolit správné řešení z tzv. Pareto fronty na základě expertního odhadu či předem daného přístupu. Pareto fronta představuje množinu řešení, kde již není možné získat zlepšení v žádném směru bez zhoršení jiného a rozhodnutí by tak mělo reflektovat očekávané dopady na systém.

Dalším klíčovým bodem je zohlednění reálných závislostí, které mají často nelineární charakter. S ohledem na zachování výhodných vlastností lineárního modelu je tedy přistoupeno k implementaci SOS proměnných („Special ordered set“) [B104], které umožňují nelineární funkce aproximovat. Konkrétně proměnné typu SOS 1 vybírají jednu z možností předdefinovaných scénářů, zatímco proměnné typu SOS 2 nahrazují původní funkci pomocí po částech lineární funkce. Tyto modelovací techniky umožňují převést nelineární úlohy na problém celočíselného programování s libovolnou přesností, avšak s jejich narůstajícím počtem lze očekávat také výrazné zvyšování výpočetních nároků.

V následující části jsou definovány využívané symboly při zápisu matematického modelu. Symboly jsou rozděleny do skupin dle charakteru jejich značení na množiny, parametry a proměnné.

### Množiny

$a \in A$	množina hran reprezentující toky mezi uzly
$i \in I$	množina uzlů
$i \in I^Q$	podmnožina obsahující pouze producenty
$i \in I^E$	podmnožina obsahující pouze existující zařízení (lineární závislost, fixní kapacita)
$i \in I^P$	podmnožina obsahující pouze potenciální zařízení (nelineární závislost)
$k \in K$	body pro „Special ordered set“
$o \in O$	množina typů odpadů

### Parametry

$B_{i,o,oo}$	koeficienty definující tvorbu reziduálních toků v uzlu $i$ , [-]
$C_i^E$	kapacita pro existující zařízení v uzlu $i$ , [kg]
$C_{i,k}^P$	kapacitní scénář $k$ pro zařízení v uzlu $i$ , [kg]
$C_{i,o}^O$	kapacita omezující vstup vybraného typu odpadu do uzlu $i$ , [kg]
$E_i^E$	vyprodukované emise během zpracování odpadu v uzlu $i$ , [CO <sub>2eq</sub> /kg]
$E_{i,k}^P$	vyprodukované emise během provozu a postavení scénáře $k$ v uzlu $i$ , [CO <sub>2eq</sub> ]
$E_a^T$	vyprodukované emise během dopravy odpadu po hraně $a$ , [CO <sub>2eq</sub> /kg]
$F_i^E$	cena za zpracování odpadu v uzlu $i$ , [CZK/kg]
$F_{i,k}^P$	cena za postavení kapacitního scénáře $k$ v uzlu $i$ , [CZK]
$F_a^T$	cena za dopravu odpadu po hraně $a$ , [CZK/kg]
$M_{a,i}$	incidenční matice popisující vstupní a výstupní uzel všech hran, [-]
$P_s$	pravděpodobnost scénáře $s$ , [-]
$Q_{i,o,s}$	evidované množství produkce odpadu typu $o$ v uzlu $i$ ve scénáři $s$ , [kg]
$w^{ENV}$	váha pro normalizaci environmentálního kritéria v účelové funkci, [1/CO <sub>2eq</sub> ]
$w^{FIN}$	váha pro normalizaci ekonomického kritéria v účelové funkci, [1/CZK]
$\lambda$	parametr definující kompromis mezi uvažovanými kritérii $i$ , [-]

### Proměnné

$R_{i,o,s}$	reziduální odpad typu $o$ vytvořený procesem v uzlu $i$ ve scénáři $s$ , [kg]
$x_{a,o,s}$	množství odpadu typu $o$ transportovaného po hraně $a$ ve scénáři $s$ , [kg]
$z^{ENV}$	účelová funkce environmentálního kritéria, [CO <sub>2eq</sub> ]
$z^{FIN}$	účelová funkce ekonomického kritéria, [CZK]
$\delta_{i,k}$	SOS proměnná pro výběr kapacitního řešení $k$ v uzlu $i$ , [-]

Jako první je uvedena účelová funkce, která je koncipována pro optimalizaci dvou kritérií, konkrétně ekonomického a environmentálního. Příslušný matematický zápis je uveden v rovnici (4.1). Jelikož parametry týkající se jednotlivých kritérií mohou nabývat různě velkých hodnot, je vhodné při více kritériální optimalizaci využít normalizace. Příslušné koeficienty  $w^{ENV}$  a  $w^{FIN}$  je možné získat jako výsledky optimalizace pouze daného kritéria. V účelové funkci dále vystupuje člen  $\lambda$ , který je předmětem výběru vhodného řešení z Pareto fronty. Tento parametr tak s vyšší hodnotou klade větší důraz na environmentální kritérium.

$$\min \left( \lambda \frac{z^{ENV}}{w^{ENV}} + (1 - \lambda) \frac{z^{FIN}}{w^{FIN}} \right). \quad (4.1)$$

Následně je nutné definovat dílčí kritéria, jejichž obecná forma je ekvivalentní, jen s jinými vstupními parametry, viz rovnice (4.2) a (4.3). Úloha je modelována jako dvojstupňová, přičemž v prvním stupni jsou realizována strategická rozhodnutí o jednotlivých zařízeních a ve druhém stupni jsou operativní rozhodnutí v závislosti na konkrétním scénáři, který má předem definovanou pravděpodobnost  $P_s$ . Strategická rozhodnutí se týkají těch částí systému, které není možné měnit v krátkém časovém horizontu (výstavba ZEVO), zatímco operativní rozhodnutí (plánování dopravy) je možné přizpůsobit konkrétním podmínkám v dané situaci. Výraz  $F_{i,k}\delta_{i,k}$  tedy představuje rozhodnutí o tom, kde má být zařízení postaveno a s jakou kapacitou  $k$ . Symbol  $\delta_{i,k}$  je SOS proměnná, která je využívána z důvodu modelování nelineární závislosti nákladů na kapacitě zařízení. V následujícím druhém stupni modelu výraz  $F_i^E M_{a,i} x_{a,o,s}$  charakterizuje náklady na zpracování v zařízeních, které mají fixně stanovenou cenu za tunu odpadu bez investičních nákladů a výraz  $F_a^T x_{a,o,s}$  pak zastupuje náklady na dopravu odpadu.

$$z^{FIN} = \sum_{i \in I^P} \sum_{k \in K} F_{i,k}^P \delta_{i,k} + \sum_{s \in S} P_s \left( \sum_{a \in A} \sum_{i \in I^E} \sum_{o \in O} F_i^E M_{a,i} x_{a,o,s} + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} F_a^T x_{a,o,s} \right). \quad (4.2)$$

$$z^{ENV} = \sum_{i \in I^P} \sum_{k \in K} E_{i,k}^P \delta_{i,k} + \sum_{s \in S} P_s \left( \sum_{a \in A} \sum_{i \in I^E} \sum_{o \in O} E_i^E M_{a,i} x_{a,o,s} + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} E_a^T x_{a,o,s} \right). \quad (4.3)$$

Nejdůležitějším omezením je zajištění bilance, kde pro každý uzel je nutné definovat maximální kapacitu. Omezení lze rozdělit do několika skupin dle povahy uzlu. První skupinou jsou producenti odpadu, od kterých je nutné odpad převézt do zpracovatelských zařízení a jejich kapacita je tak nulová. Příslušná rovnice (4.4) postupně obsahuje primární produkci  $Q_{i,o,s}$  a toky odpadu  $M_{a,i} x_{a,o,s}$ , jejichž suma musí pro každého producenta a v každém scénáři být nula. Hodnota nula je vynucena z důvodu zamezení tvorby imaginárního odpadu, který by mohl mít v případě některých typů zpracování pozitivní vliv na účelovou funkci. Pro zařízení s lineární cenou je definováno kapacitní omezení pomocí rovnice (4.5), kde se na rozdíl od producentů očekává sekundární produkce  $R_{i,o,s}$  (rezidua) a maximální definovaná kapacita  $C_i$ . Zařízení modelovaná pomocí SOS proměnných mají kapacitu závislou na rozhodnutí modelu a maximální množství zpracovaného odpadu je nutné formulovat jako  $C_i \delta_{i,k}$  (viz rovnice (4.6)). Aby bylo možné definovat přípustné toky odpadu dle vhodných technologií a typu odpadu, je implementována rovnice (4.7), kde vystupuje parametr  $C_{i,o}^O$ , jenž pro každý typ odpadu nabývá hodnoty 0 nebo dostatečně velkého neomezuujícího čísla.

$$\sum_{o \in O} Q_{i,o,s} + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} M_{a,i} x_{a,o,s} = 0, \quad \forall i \in I^Q, \forall s \in S. \quad (4.4)$$

$$\sum_{o \in O} R_{i,o,s} + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} M_{a,i} x_{a,o,s} \leq C_i^E, \quad \forall i \in I^E, \forall s \in S. \quad (4.5)$$

$$\sum_{o \in O} R_{i,o,s} + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} M_{a,i} x_{a,o,s} \leq \sum_{k \in K} C_{i,k}^P \delta_{i,k}, \quad \forall i \in I^P, \forall s \in S. \quad (4.6)$$

$$Q_{i,o,s} + R_{i,o,s} + \sum_{a \in A} M_{a,i} x_{a,o,s} \leq C_{i,o}^O, \quad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall s \in S. \quad (4.7)$$

Dalším omezením je rovnice (4.8) popisující vznik reziduálních toků. Klíčovým vstupem do rovnice je parametr  $B_{i,o,oo}$ , který obsahuje koeficienty účinnosti zařízení, respektive hmotností poměry tvorby sekundárního odpadu vzhledem ke vstupu. Každá technologie (uzel  $i$ ) má tak pro každý odpad na vstupu (index  $oo$ ) definovaný procentuální podíl vzniku jiného odpadu (index  $o$ ). Předpokladem je, že reziduální odpad zařízení neumí zpracovat a je tak nutné ho převést do jiného zařízení. Uvedenou rovnici lze využít i pro definici např. využitelného materiálu, který je možné následně promítnout do účelové funkce jako zisk či úsporu emisí vyplývající z využití druhotných surovin.

$$R_{i,o,s} = \sum_{a \in A} \sum_{oo \in O} B_{i,o,oo} M_{a,i} x_{a,oo,s}, \quad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall s \in S. \quad (4.8)$$

Pro správnou funkci modelu je dále nutné uvést doplňující podmínky sestávající se zejména z nezápornosti proměnných. Specificky je nutné nezápornost zohlednit u toků odpadu (viz rovnice (4.9)) a SOS proměnných týkajících se rozhodnutí o výstavbě nových zařízení (viz rovnice (4.10)), jejichž součet v rámci jedné lokality musí být roven 1. Tato forma implementace SOS proměnných vyžaduje také modelovat nulovou kapacitu představující nepodpoření vybraného projektu.

$$x_{a,o,s} \geq 0, \quad \forall a \in A, \forall o \in O, \forall s \in S. \quad (4.9)$$

$$\delta_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \quad \sum_{k \in K} \delta_{i,k} = 1, \quad \forall i \in I. \quad (4.10)$$

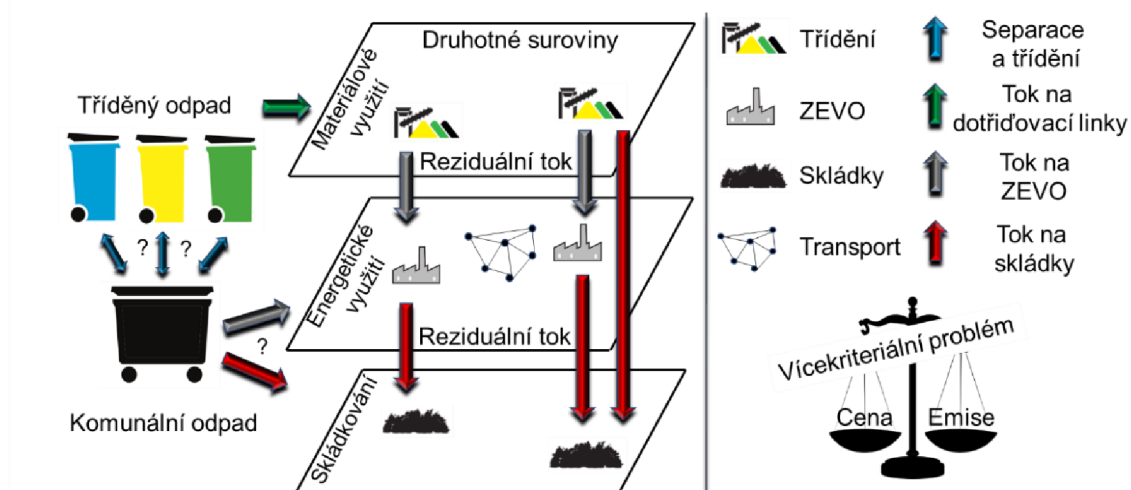
Matematický model lze charakterizovat jako TS-MILP („Two Stage Mixed Integer Linear Programming“) založený na toku v síti s orientovaným bipartitním grafem. Na závěr je nutné podotknout, že následující aplikace při řešení vybraných úloh jsou oproti publikovanému zápisu v odborných časopisech odlišné (odkazy na příslušné studie jsou uvedeny níže). To je způsobeno rozdílným modelováním různých frakcí odpadu, které jsou v publikacích řešeny v rámci vhodného pre-processingu a pro každý odpad je vytvořen samostatný uzel. To umožňuje lépe řídit výpočtovou náročnost a modelovat pouze ty struktury, které jsou potřebné. Pro lepší pochopení problematiky a celkového zápisu bylo však v této dizertační práci přistoupeno k reformulaci, kdy jsou jednotlivé typy odpadů modelovány s využitím množiny  $O$ . Tento přístup zároveň umožnil vytvoření obecného rámce modelu s dodatečnými omezeními či drobnými úpravami.

Následující kapitoly popisují jednotlivé studie, přičemž každá část představuje samostatnou publikaci. Nejprve je řešena optimální míra separace s ohledem na náklady zpracovatelského řetězce a dopadů na životní prostředí. Důležitou součástí nakládání s odpady je jejich energetické využití, kdy tomuto tématu je věnována samostatná kapitola zohledňující provozní podmínky ZEVO. S ohledem na výsledky těchto studií je dále řešena recyklace plastového odpadu, jelikož tento specifický proud vyžaduje řešení ve větším detailu. Poslední kapitolu představuje vyhodnocení současných kapacit pro nebezpečný odpad. Zde je nutné podotknout, že výsledky optimalizace nelze mezi jednotlivými modely detailně porovnávat, jelikož jejich řešení je časově posunuto, s čímž se měnili některé okrajové podmínky úloh, jako například prognózy produkce odpadu či cenové odhady v budoucích letech.

## 4.2 Optimalizace míry separace

První úlohou postavenou na problému optimalizace toku v síti s ohledem na lokalizaci zpracovatelských míst je zaměřena na míru separace odpadů. V současnosti je hojně propagováno navyšování separace na maximální úroveň a s tím spojená osvěta lidí a zahušťování sběrné sítě pro různé komodity. Tyto tendence mají své opodstatnění při pohledu na ekologické dopady spojené s likvidací odpadu. Z pohledu ekonomické udržitelnosti systému se však nabízí otázka, jestli tento maximalistický přístup k materiálovému využití je adekvátní a zda-li tento systém skutečně poskytne očekávané benefity. Ve výsledku může snaha o maximální separaci vyústit v neefektivní nakládání s finančními prostředky a z důvodu dopravy a opakovaných třídících procesů může být negativně ovlivněna i environmentální složka systému. Z pohledu plánování optimální infrastruktury je tak žádoucí disponovat informacemi a patřičným vhladem do této problematiky.

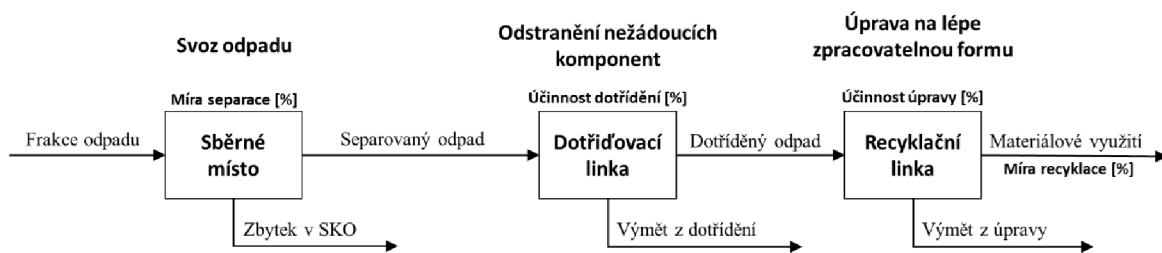
Cílem je navrhnout optimalizační model, který na základě dat účinnosti recyklace z reálných provozů určí odpovídající míru separace dílčích komodit a navrhne optimální zpracovatelskou infrastrukturu včetně alokace odpadových proudů. Schéma uvažovaného systému je znázorněno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Schéma uvažovaného systému pro vyhodnocení optimální míry separace a zpracovatelskou infrastrukturu.

Uvažovaný systém představuje několika stupňovou strukturu, kde jednotlivé úrovně jsou vzájemně propojeny vznikem reziduálních odpadů po každém procesu. Finálním zařízením pro reziduální (materiálově nevyužitelné a nespálitelné odpady) je skládka, přičemž předpokládaným cílem je minimalizace skládkovaného odpadu a snaha o dodržení hierarchie nakládání. Optimalizační model však na základě vstupních parametrů má možnost rozhodnout, co je z pohledu ekonomického a environmentálního kritéria nejvýhodnější, přičemž bude nutné zahrnout expertní odhad při volbě odpovídajícího kompromisu mezi náklady a dopady na životní prostředí. Zpracovatelská infrastruktura zahrnuje nejčastěji používané metody zpracování odpadů pro KO. Konkrétními uvažovanými typy zařízení jsou ZEVO, třídící linky (pro různé materiály), překládací stanice pro možnost levnější přepravy díky lisování a skládky. Recyklační zařízení pro finální zpracování druhotného materiálu jsou v tomto případě uvažovány v rámci třídících linek pro jednodušší integraci účinností. Optimalizační model tak musí navrhnout vhodný mix zařízení s odpovídající kapacitou a lokalizací v rámci řešeného území.

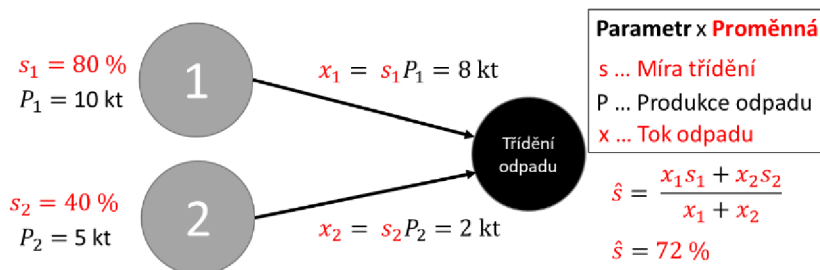
Materiálové využití odpadu je dále modelováno ve větším detailu a výsledné množství druhotných surovin je ovlivněno dílčími částmi procesu. Na sběrném místě je nutné provést rozhodnutí, kolik procent se dané frakce bude třídit, tj. jak intenzivně budou občané třídit odpad. Dále je vytríděný odpad převezen k dotřídění, kde množství využitelného odpadu je dáno účinností závisující právě na rozhodnutí o míře separace v předchozím kroku. Dotříděný odpad je následně dopraven k recyklaci, kde je opět množství suroviny ovlivněno účinností. Z každé části procesu vznikají reziduální proudy odpadu (výměty), které je nutné zpracovat či odstranit jiným způsobem. Matematický model je tak nucen rozhodnout, zda-li je tento složitý proces s řadou reziduí výhodný, musí navrhnout zařízení pro zpracování výmětů s ohledem na míru separace a případně navrhnout odpovídající alternativu v oblasti energetického využití či skládkování. Schéma popisující tok odpadu v rámci materiálového využití je na Obr. 4.2. Očekávané účinnosti pro papír a plasty byly prezentované v kapitole 2.2.



Obr. 4.2: Schéma popisující toky odpadu pro materiálové využití.

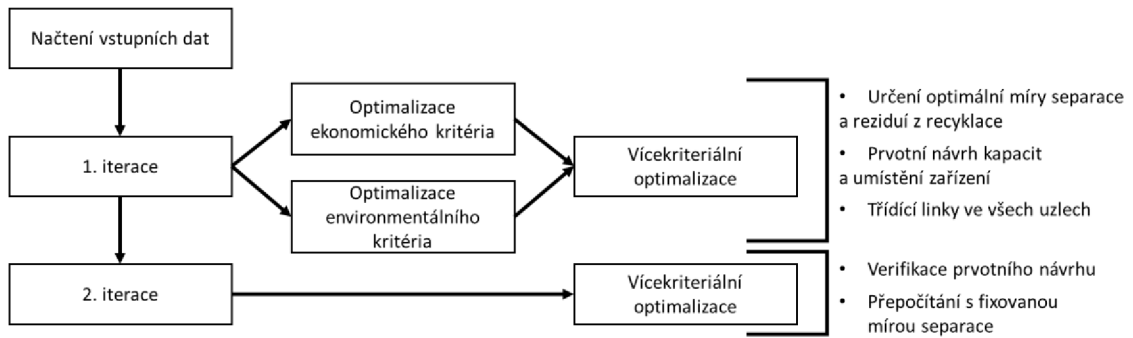
#### 4.2.1 Matematický aparát

Základ matematického modelu je uveden v kapitole 4.1, který zajišťuje bilanční rovnice v uzlech a tvorbu reziduálních proudů mezi zařízeními. Podstata modelovaného problému je však komplikovanější a je nutné do modelu zahrnout další omezení a přístupy pro efektivní výpočet. Největší překážku při optimalizaci míry separace představuje implementace váženého průměru v místě dotřídovacích linek, jelikož vstupní proudy odpadu mohou mít odlišnou kvalitu. Vzhledem k tomu, že míra separace ovlivňuje účinnost dotřídění, je nutné pomocí váženého průměru vyhodnotit kvalitu dotřídované směsi. Příslušný problém je znázorněn na Obr. 4.3



Obr. 4.3: Ukázka váženého průměru vstupních toků pro definici účinnosti dotřídění.

Kvalita odpadu je tedy dána váženým průměrem, kde všechny vstupní hodnoty jsou předem neznámé. To představuje nelineární problém, který lze jen stěží řešit v potřebném detailu a bez garance globálního optima. Tento problém lze s implementací vhodného zjednodušení vyřešit rozdělením výpočtu na dvě iterace. Postup řešení je zobrazen na Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Schéma popisující iterační postup řešení úlohy.

Na začátku výpočtu jsou načtena vstupní data, které jsou zpracována vhodným pre-processingem. V první iteraci výpočtu se předpokládá existence dotřídřovací linky v každém uzlu, přičemž producent odpadu musí separované frakce odpadu zpracovat v místě produkce. V tomto případě není tedy nutné uvažovat vážený průměr, jelikož účinnost dotřídění je vypočtena na základě jednoho proudu. V tomto kroku je tak získán poměr mezi recyklovatelným odpadem a výmětem u každého producenta, který je možné využít v následující iteraci. Zjištěný poměr se aplikuje přímo na daného producenta, kdy pomocí omezení je vytvořena vazba, která zajistí přepravu příslušného výmetu společně s vytríděným materiálem. V první iteraci je dále nutné řešit úlohu nejprve z pohledu jednotlivých kritérií pro normalizaci účelových funkcí ve vícekritériální optimalizaci.

Rozdílem oproti původnímu modelu je především absence scénářů produkce, která je nyní předmětem optimalizace. V rámci první iterace je cílem určit optimální míru separace v jednotlivých uzlech u všech uvažovaných frakcí. Toto rozhodnutí je realizováno pomocí koeficientu  $D_{i,o}$ , který vyjadřuje procentuální poměr využití odhadovaného potenciálu produkce vybraných komodit  $Q_{i,o}^{POT}$ . Na základě tohoto rozhodnutí je vypočítána produkce odpadu  $Q_{i,o}^I$ , který musí být následně zpracován (viz rovnice (4.11)).

$$Q_{i,o}^I = D_{i,o} Q_{i,o}^{POT} + \sum_{o \in O} (1 - D_{i,oo}) Q_{i,o}^{POT} G_{o,oo}, \quad \forall i \in I^Q, \forall o \in O. \quad (4.11)$$

Parametr  $G_{o,oo}$  představuje pomocnou matici pro přesunutí neseparovaného odpadu  $(1 - D_{i,oo}) Q_{i,o}^{POT}$  do SKO. Pro rozhodnutí o separaci  $D_{i,o}$  je nutné dále definovat podmínku určující přípustné hodnoty pomocí rovnice (4.12). Parametr  $D_o^{MAX}$  stanovuje maximální hranici pro separaci, přičemž u separovaných složek se uvažuje hodnota 1 a u SKO hodnota 0.

$$0 \leq D_{i,o} \leq D_o^{MAX}, \quad \forall i \in I^Q, \forall o \in O. \quad (4.12)$$

Pro zajištění podmínek definovaných pro první separaci je nutné omezit hrany pro separovaný odpad směřující do jiných třídících linek než v místě produkce. Toto omezení je implementováno pomocí rovnice (4.13), kde parametr  $H_a^{MAX}$  obsahuje hodnotu 0 pro zákaz transportu a dostatečně velké neomezující číslo pro povolený transport.

$$0 \leq x_{a,o} \leq H_a^{MAX}, \quad \forall a \in A, \forall o \in O. \quad (4.13)$$

Jako další úpravu oproti obecnému modelu je modelování třídících linek a následný vznik reziduálního odpadu. Pomocí rovnice (4.14) jsou vypočítány náklady související s provozem dotřídřovací linky, které jsou modelovány jako nelineární vzhledem k množství odpadu a

příslušné závislosti jsou tedy implementovány pomocí SOS2 proměnných. Jelikož je povolen tok odpadu pouze z místa produkce, lze množství zpracovaného odpadu vztáhnout přímo na modelem určenou produkci  $D_{i,o}Q_{i,o}^{POT}$ . Rovnice je definovaná pouze pro třídící linky, které jsou zastoupeny v množině  $I^{TL}$ .

$$\sum_{k \in K} S_{i,o,k} \beta_{i,o,k} = D_{i,o} Q_{i,o}^{POT}, \quad \forall i \in I^{TL}, \forall o \in O. \quad (4.14)$$

Stejnou SOS2 proměnnou  $\beta_{i,o,k}$  lze využít i pro implementaci účinnosti dotřídění odpadu v závislosti na míře separace pomocí rovnice (4.15), jelikož parametr  $B_{i,o,oo,k}$  již zohledňuje maximální množství odpadu a tím také odpovídající míru separace. Oproti původnímu modelu tak zde u matice koeficientů pro reziduální odpadu vystupuje také index  $k$ , který prokládá modelovanou exponenciální funkci pomocí po částech lineární funkcí.

$$R_{i,o} = \sum_{oo \in O} \sum_{k \in K} B_{i,o,oo,k} \beta_{i,oo,k}, \quad \forall i \in I^{TL}, \forall o \in O. \quad (4.15)$$

V druhé iteraci je nutné přepočítat množství odpadu dle výsledků z první iterace. V případě SKO zůstává množství odpadu nezměněno, avšak u separovaných složek je nutné definovat  $Q_{i,o}^I$  jako  $Q_{i,o}^I - R_{i,o}$  a v případě výmětu  $Q_{i,o}^I$  jako  $R_{i,o}$  (odpovídající odpadové proudy). Definované množství produkce odpadu a vznikající výměty je však nutné navázat na příslušné toky separovaného odpadu. Cílem je, aby výměty byly v rámci sítě ve druhé iteraci výpočtu transportovány ve stejném poměru, tj. v případě předání např. 50 % produkce papíru je nutné předat do stejného místa také 50 % výmětu z papíru. K tomuto účelu je vypočítán koeficient  $\varepsilon_{a,o}$  pomocí rovnice (4.16).

$$\varepsilon_{a,o} = \sum_{i \in I^Q} M_{a,i}^{OUT} \frac{\sum_{oo \in O} T_{o,oo} Q_{i,o}^I}{Q_{i,o}^I}, \quad \forall a \in A, \forall o \in O. \quad (4.16)$$

Matice  $T_{o,oo}$  přiřadí příslušný typ výmětu k příslušnému odpadu, jejichž podíl (množství výmětu z papíru děleno produkce papíru ve druhé iteraci) je následně aplikován na všechny hrany vycházející z daného uzlu pomocí matice  $M_{a,i}^{OUT}$ . Tato matice je obdobou incidenční matice s tím rozdílem, že nenulové hodnoty jsou pouze u hran vycházející mimo daný uzel a místo hodnoty -1 je uvažována hodnota 1. Následně je vytvořeno omezení (4.17), kde využitá rovnost definuje přesné množství výmětu, které musí být odesláno společně s vyseparovaným odpadem. Rovnice je definovaná pouze pro typy odpadu zastupující výměty z dotřídění  $O^{VYM}$  aby nedocházelo k omezení toků primárních odpadů.

$$\sum_{oo \in O} T_{o,oo} x_{a,oo} \varepsilon_{a,oo} = x_{a,o}, \quad \forall i \in I^Q, \forall o \in O^{VYM}. \quad (4.17)$$

Účelová funkce dále obsahuje profit plynoucí z recyklace a prodeje sekundárního materiálu, V první iteraci se jedná o množství separovaného odpadu po odstranění výmětu ( $Q_{i,o}^I - R_{i,o}$ ), zatímco ve druhé iteraci se jedná přímo o parametr  $Q_{i,o}^I$ . V dalších zařízeních mimo třídící linky je využívána forma tvorby reziduí stejně jako v obecném modelu. Stejně tak jsou uvažovány stejné bilanční rovnice zajišťující zpracování veškerého odpadu. Kompletní detaily původního modelu jsou v článku [A7]. Zdejší model oproti verzi byl upraven pro zasazení do obecného kontextu optimalizace. Jednotlivé frakce odpadu jsou modelovány jako samostatné uzly struktura modelu je tak mírně odlišná. Zde uvedená formulace může být časově náročnější, jelikož se modeluje spousta proměnných, u které jsou následně

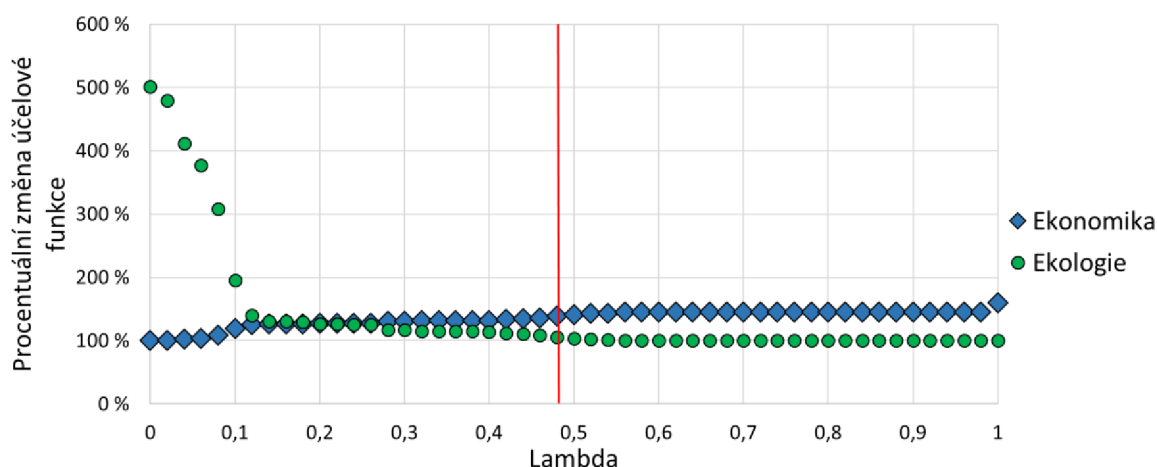


vhodným omezením vynuceny nulové hodnoty. V původním modelu byly také výměty přiřazeny do skupiny SKO, zatímco zde výměty z plastu a papíru představují samostatné proudy, které umožnili přehlednější zápis. Nicméně počet modelovaných toků se takto významně zvyšuje, ovšem lze takto následně vyhodnotit vliv jednotlivých odpadů na provoz např. ZEVO (např. v kontextu modelu uvedeném v kapitole 4.3).

#### 4.2.2 Případová studie

Představený matematický model následně byl aplikován při řešení případové studie v ČR s rozdělením na 206 ORP. Jako vstupní data byla použita dostupná sada dat o produkci odpadu za rok 2017 [B13]. Cílem bylo určit optimální míru separace pro každou komoditu (SKO, plast, papír, sklo) a určit umístění a kapacitu nových zařízení pro dotřídění odpadu a ZEVO. Celkově bylo uvažováno 29 potenciálních míst pro vhodnou integraci nových ZEVO, přičemž 4 zařízení jsou již v provozu. Možnost využití dotřídovací linky ke zpracování separovaných složek odpadu je v každém ORP a vzniklé reziduální toky mohou být zpracovány v jedné ze 113 skládek nebo být energeticky využity. Detailní informace týkající se vstupních dat lze dohledat v příslušném článku [A7].

Cílem modelu je minimalizovat celkové náklady a také dopady na životní prostředí. Optimalizace tedy spočívá v nalezení přijatelného zvýšení nákladů při současném snížení dopadu celého řetězce zpracování KO na životní prostředí. K nalezení vhodného řešení bylo provedeno 51 výpočtů s různým parametrem  $\lambda$ , který se zvyšující se hodnotou klade větší důraz na environmentální aspekt. Řešení optimalizačních úloh obsahující celočíselné proměnné může být časově náročné, a proto hledání odpovídající hodnoty parametru  $\lambda$  bylo řešeno pouze na první iteraci. Maximální doba řešení každého výpočtu byla nastavena na 1 hodinu, přičemž parametr výpočtu „relative gap“ dosahovala hodnoty 0,5 až 10 %. Závislost obou kritérií na parametru  $\lambda$  je znázorněn na Obr. 4.5.



Obr. 4.5: Závislost sledovaných kritérií na parametru  $\lambda$ .

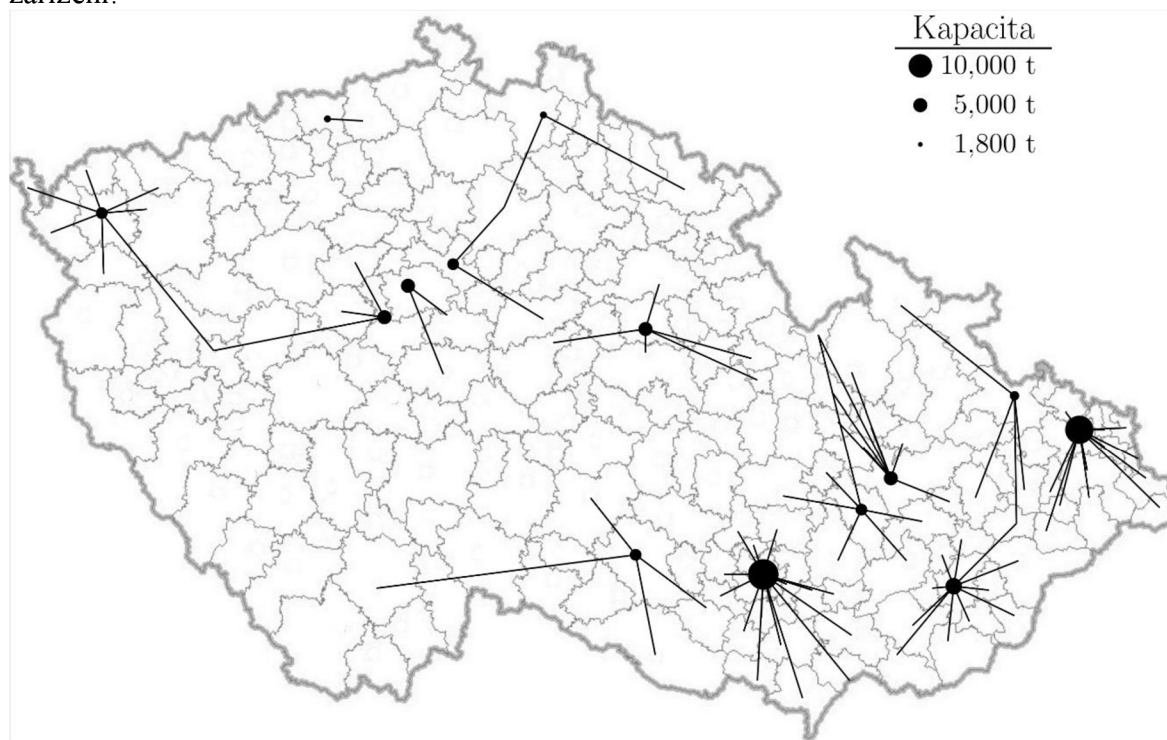
Je zřejmé, že v případě optimalizace pouze ekonomické části procesu ( $\lambda$  se rovná 0) je dopad na emise obrovský. Hodnota je téměř pětkrát vyšší než dosažené minimum. Důvodem je zejména nízká úroveň separace a preference skládkování před energetickým využitím. Pokud je optimalizován pouze aspekt životního prostředí ( $\lambda$  se rovná 1), náklady se zvýší téměř o 60 %. Jako kompromis je zvolen scénář s hodnotou  $\lambda$  0,48, jelikož představuje vhodný příklad pro verifikaci modelu a prezentaci výstupů. Z pohledu posouzení dopadů na účelovou funkci lze vybrat řešení, kde  $\lambda$  nabývá hodnoty 0,56. Při této hodnotě model doporučuje maximální třídění všech uvažovaných komodit, avšak

z pohledu konstrukce modelu by následně nebylo nutné realizovat nezbytné kroky s mírou separace a jejím vlivem na efektivitu recyklace.

Zvolený scénář byl následně optimalizován s větší alokací času, kdy je získána odpovídající míra separace ve všech produkčních uzlech. V rámci druhé iterace je odpad vhodně alokovan do jednotlivých zařízení, přičemž typickým příkladem úspory je využití větších provozních kapacit. Tento jev má naopak negativní vliv na přepravní náklady a model tedy musí najít vhodný kompromis. Výpočetní vlastnosti včetně doby výpočtu pro jednotlivé iterace jsou následující:

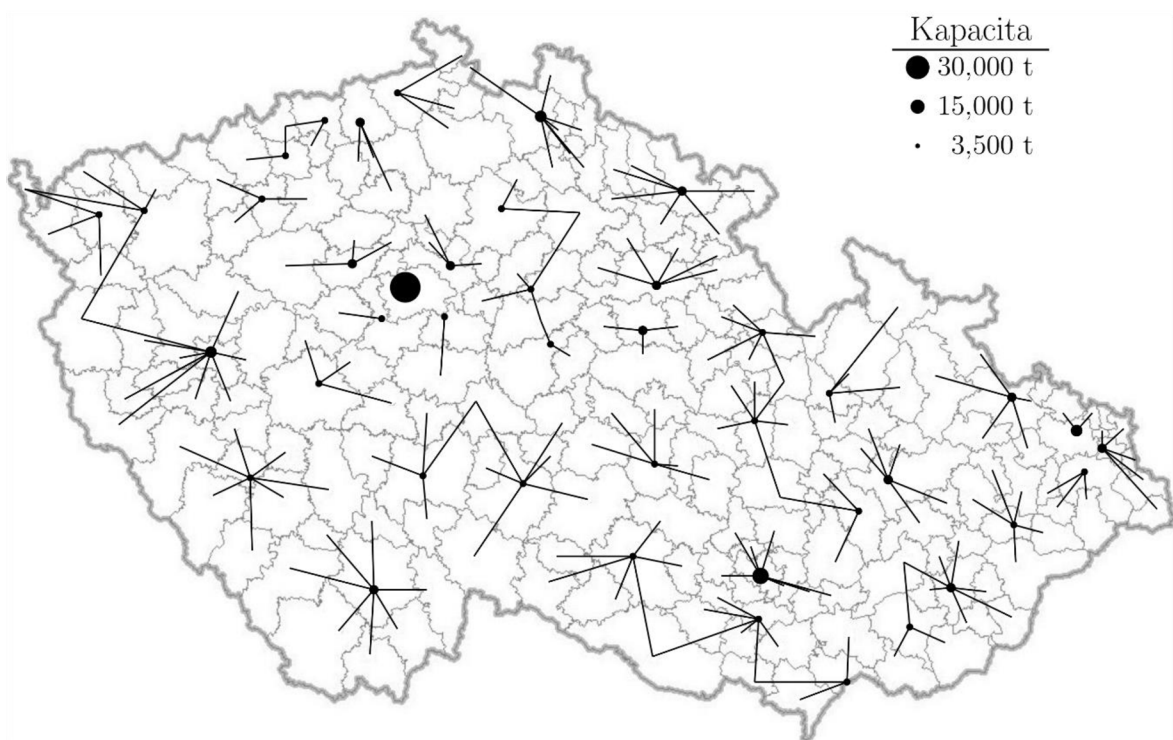
1. Iterace: 7590 celočíselných proměnných, 24105 spojitých proměnných, výpočetní čas 2 hodiny, 3,9 % relativní chyba.
2. Iterace: 7590 celočíselných proměnných, 53592 spojitých proměnných, výpočetní čas 15 hodin, 5,7 % relativní chyba.

Prvním odpadovým proudem je plast, jehož tok a lokace třídících linek je znázorněna na Obr. 4.6. Je patrné, že separace plastového odpadu je výhodná zejména na východě ČR a také v oblastech s velkou produkcí odpadu. Průměrná míra separace na území ČR je 52 %. V oblastech, ze kterých není veden tok na Obr. 4.6, není modelem doporučeno separovat plast. Netřídění plastů v ostatních oblastech je způsobeno především vysokou cenou za sběr, která je ovlivněna zejména umístěním v regionu a počtem obcí s ohledem na jejich velikost. V případě vysoké koncentrace odpadu je výhodné separovat alespoň část odpadu, jelikož při nízké míře separace je účinnost dotřídění plastů vysoká a nedochází k formování tak velkého množství reziduálních toků. Tento výsledek je také do jisté míry ovlivněn agregací plastového odpadu, kdy některé frakce, například PET, mají vyšší cenu. V případě rozdělení na více frakcí s individuálními cenami tak lze předpokládat, že určitý typ plastů bude modelem doporučeno vytřídit a míra separace nebude nulová v žádném regionu. Obecně lze konstatovat, že výpočet nedoporučuje dotřídovací linky s malou provozní kapacitou a je výhodnější zvážit přepravu na větší vzdálenost a za nižší cenu zpracovat odpad ve větším zařízení.



Obr. 4.6: Výsledná mapa toků plastu a rozmístění příslušných třídících linek.

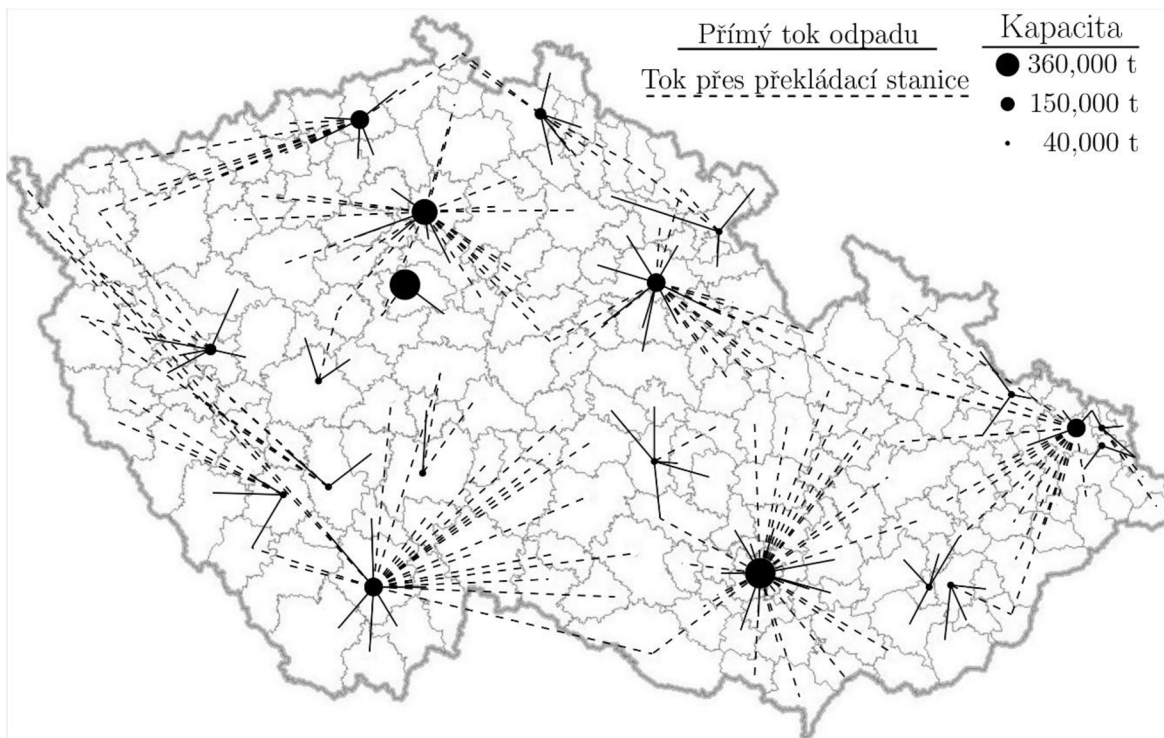
Další analyzovanou frakcí je papír. Výsledná mapa s toky odpadu a rozmístěním dotřídovacích linek je uvedena na Obr. 4.7. Jelikož je papír po dotřídění cennou komoditou, lze jej prodat se ziskem a jako sekundární materiál je často výhodnější než primární suroviny. Z toho důvodu je doporučeno modelem třídit papír na maximum ve všech regionech. Model vyhodnotil, že integrace většího počtu třídících linek je výhodnější než centralizace na konkrétních místech. Je to zejména proto, že na rozdíl od plastového odpadu je papíru produkováno více a je možné tak disponovat poměrně širokou sítí dotřídovacích linek. Celkově bylo v ČR navrženo 42 třídících linek s průměrnou kapacitou kolem 5 kt. Výjimkou jsou oblasti s velkou produkcí odpadu, kde se využívá větší kapacita zařízení k pokrytí vlastní produkce. Tuto skutečnost lze pozorovat zejména v okolí krajských měst.



Obr. 4.7: Výsledná mapa toků papíru a rozmístění příslušných třídících linek.

V ČR existuje více než 90 dotřídovacích linek rovnoměrně rozmístěných po celém státě. Fungují však v kombinovaném provozu, kde jsou plasty a papír tříděny ve stejném zařízení. Prezentovaný model uvažoval tato zařízení zvlášť. Všechny navrhované třídící linky pro plasty byly však umístěny v místě třídící linky pro papír. Model tedy ve výsledku navrhuje celkem 42 dotřídovacích linek, kde 14 z nich pracuje v kombinovaném provozu. Je třeba zmínit, že zahrnutí kombinovaného provozu do modelu by mohlo navýšit míru separace plastů, jelikož by jejich provoz byl výhodnější při přepočtu na tunu zpracovaného odpadu.

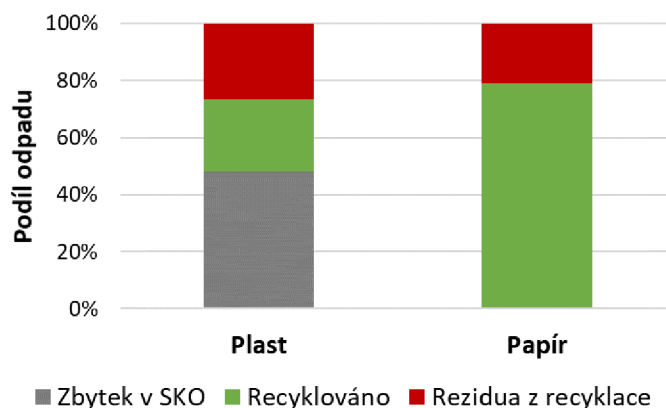
Největší část odpadu tvoří SKO, které v tomto modelu zahrnuje jak nevytříděný odpad, tak i reziduální toky z dotřídovacích linek. Pro jeho zpracování jsou v uvažovaném scénáři využívána pouze ZEVO díky výrazně nižším emisím ve srovnání se skládkami. Zároveň je zde zohledněna úspora vyprodukovaných emisí v porovnání s využitím fosilních paliv pro výrobu tepla či elektřiny. Skládky jsou tak využívány pouze pro strusku po energetickém využití odpadu. Navržené řešení modelu pro tok SKO ZEVO k energetickému využití je zobrazeno na Obr. 4.8. Toky strusky na skládku jsou vždy realizovány na nejbližší, ve skutečnosti často patřící samotnému zařízení.



Obr. 4.8: Výsledná mapa toků SKO a rozmístění ZEVO.

Zde je možné si povšimnout využití překládacích stanic v případě transportu na větší vzdálenost. Konkrétně je transport s překládkou a lisováním výhodný, pokud je realizován na větší vzdálenost než 50 km. Celkově je využíváno 20 ZEVO v různých lokalitách. Menších zařízení je 13, které jsou výhodné kvůli uplatnění vyrobeného tepla, zatímco velké zařízení se využívají v případě velké koncentrace odpadu, čímž je možné ušetřit na transportních nákladech a využít maximální efektivitu pramenící z velikosti zařízení.

Konečné množství odpadu zpracovaného dotřídňovacími linkami je znázorněno na Obr. 4.9. Celková míra separace plastů dosahuje 52 % z nichž více jak polovina je nevhodná pro materiálové využití. Zde je právě patrná značná neefektivita v důsledku přítomnosti řady příměsí, nečistot a vícedruhového materiálu. Naopak v případě papíru je výhodné separovat veškerý papír, u kterého pětina po dotřídění odchází k energetickému využití. Model dále doporučuje třídít sklo v maximální možné míře, jelikož v součtu obou kritérií je výhodnější realizovat sběr odpadu a většinu materiálově využít než uložit na skládku. V případě skla dochází k minimální tvorbě výmetů díky jeho vlastnostem a v podstatě neomezeného počtu cyklů recyklace. Proto je tento proud z analýzy vynechán, jelikož separované sklo je často předmětem zpracování přímo ve sklárnách. V modelu bylo sklo uvažováno pouze v případě sběru odpadu, kdy byl vyhodnocován poměr mezi cenou za svoz a benefity vyplývající z využití sekundárního materiálu, přičemž model navrhnul maximální možnou míru separace. V rámci plnění cílů souvisejících s materiálovým využitím odpadu je však nutné separovat veškerý odpad. Výstupy modelu ale indikují, že současná podoba zpracovatelského řetězce není v případě plastů efektivní. V případě integrace pokročilejších a automatizovaných technologií lze však očekávat lepší výsledky.



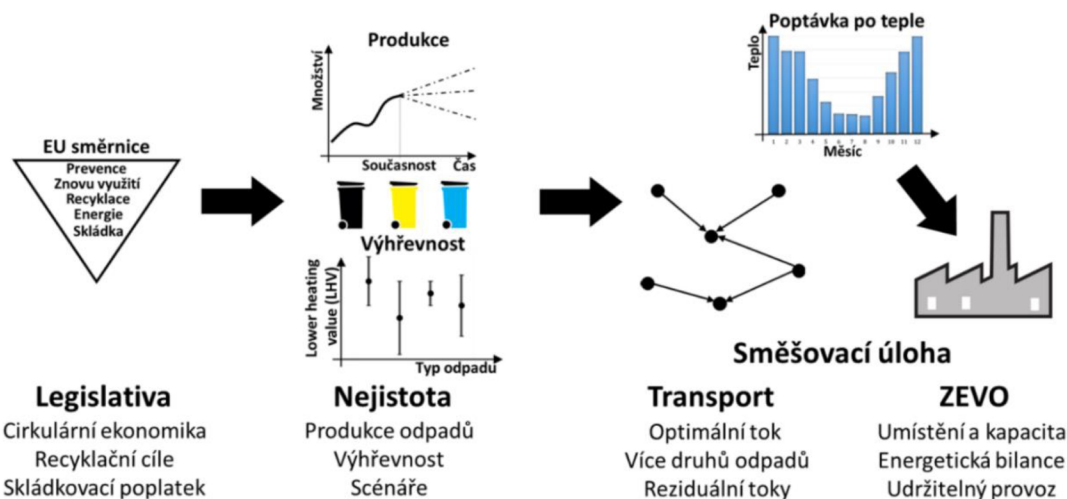
Obr. 4.9: Modelem vypočítaný podíl separovaného a materiálově využitého odpadu.

### 4.3 Energetické využití odpadu

Hierarchie cirkulární ekonomiky cílí na předcházení vzniku odpadu či na opětovné využití. Alternativou je materiálové využití v rámci různých procesů, které jsou schopny z odpadu získat sekundární materiál. Kvůli různým vlastnostem odpadu, původu či příměsím však nelze veškerý odpad recyklovat. Odpad však také představuje významný zdroj energie a proto by měl být využit alespoň k energetickému využití namísto ukládání na skládky [B105]. Moderní ZEVO využívají odpad pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny (kogeneraci), přičemž jejich následný prodej může tvořit až 50 % příjmů zařízení [B106]. Dodávka tepla je však omezena poptávkou v regionu, jelikož je nutné napojení na síť centrálního zásobování teplem. Nicméně přebytečná energie může být přeměněna na elektřinu. Celková účinnost kogenerace je vyšší než oddělená výroba tepla a elektřiny a lze tak získat až o 30-40 % více energie [B59].

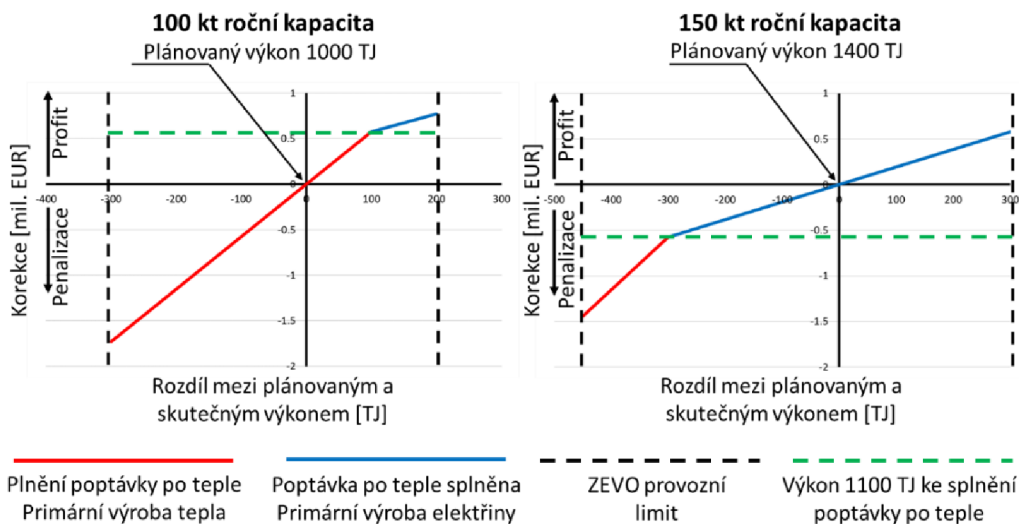
Provoz ZEVO je omezen maximálním výkonem dle původního návrhu projektu, zároveň je zařízení limitováno množstvím zpracovaného odpadu. Optimální provoz zařízení vychází ze stavu, kdy je spalováno maximální množství odpadu s průměrnou výhřevností KO. Výhřevnost odpadu však nelze příliš predikovat, jelikož závisí zejména na složení odpadu a jeho vlhkosti. V případě, že ZEVO bude mít větší podíl výhřevnějšího odpadu (např. plastů), nebude moci spalovat plánované množství odpadu, což se negativně promítne do ekonomické bilance zařízení. Naopak, bude-li spalovaná směs mít příliš nízkou výhřevnost (např. kvůli velkému podílu bioodpadu nebo absenci výhřevných komponent), bude klesat příjem z prodaných energií a v extrémním případě musí ZEVO přistoupit ke spalování zemního plynu, aby byly dodrženy podmínky pro spalování či nasmlouvané dodávky energií.

Při plánování budoucí infrastruktury pro energetické využití odpadu je klíčové vhodně lokalizovat a nadimenzovat jednotlivá ZEVO s ohledem na regionální podmínky. Tato strategická rozhodnutí musí zohlednit vývoj odpadu včetně jeho složení a výhřevnosti. Cílem je navrhnout optimální zpracovatelský řetězec pro odpad z pohledu ekonomické udržitelnosti a také s ohledem na provozní podmínky ZEVO. Strategická rozhodnutí o umístění a kapacitách ZEVO musí reflektovat také operativní rozhodnutí, které je možné realizovat vždy s ohledem na aktuální situaci. Představený přístup zahrnuje rozšíření obecného modelu o provozní podmínky ZEVO. Klíčové prvky tohoto přístupu jsou znázorněny na Obr. 4.10, kde s ohledem na hierarchii nakládání a nejistotu produkce složení odpadu je vytvořen aparát pro návrh optimální infrastruktury energetického využití.



Obr. 4.10: Klíčové prvky modelovaného systému při návrhu infrastruktury ZEVO.

Pro implementaci vlivu provozních podmínek je navržena tzv. korekční funkce, která bere v úvahu množství přijatého odpadu a výhřevnost spalované směsi odpadu. Tyto parametry definují tepelný výkon, jenž v rámci provozních podmínek má své limity. Hlavní myšlenkou je, že ZEVO zůstává v režimu výroby kogenerace tepla a elektřiny, dokud není splněna poptávka po teple, která může v rámci jednotlivých měsíců být velmi variabilní. Následně všechna zbývající energie slouží pouze pro výrobu elektřiny. Za předpokladu, že odpovídající prodeje energie vzhledem ke kapacitě zařízení jsou již zahrnuty v ceně na bráň, lze korekční funkci definovat jako ekonomické dopady odchylky od plánovaného provozu. Pro každé zařízení tak lze na základě technickoekonomického modelu stanovit korekční funkci s ohledem na plánované provozní podmínky. Příklady funkcí pro dvě různé kapacity se stejnou poptávkou po teple jsou znázorněny na Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Příklad korekční funkce dvou různých zařízení ve stejné lokalitě.

Korekční funkce vlevo na Obr. 4.11 ukazuje případ, kdy je poptávka po teple vyšší, než může ZEVO s kapacitou 100 kt za plánovaných podmínek (počátek souřadnic) vyrobit. Poptávku po teple lze však uspokojit spalováním odpadové směsi s vyšší výhřevností a získat tak dodatečné příjmy. Když je poptávka po teple uspokojena, veškerá přebytečná energie je přeměněna na elektřinu, avšak s menší účinností a návratností. V případě nižšího tepelného

výkonu ZEVO produkuje méně elektřiny i tepla, což vede k výraznějšímu snížení zisků. Korekční funkce vpravo naopak ukazuje zařízení s kapacitou 150 kt, kde hranice zobrazující poptávku po teple je nižší a je tak při plánovaném provozu uspokojena. S větším než plánovaným výkonem se tak převážně generuje elektřina, zatímco menší výkon ovlivňuje pouze prodej elektřiny. Modelování korekční funkce je realizováno na měsíční bázi s rovnoměrně alokovanou roční kapacitou spalovaného odpadu. Pro získání roční korekční funkce jsou jednotlivé funkce sečteny.

### 4.3.1 Matematický aparát

Matematický model pro popis problému týkajícího se plánování infrastruktury pro energetické využití odpadu využívá obecnou strukturu modelu uvedeného v kapitole 4.1. Hlavním rozdílem je implementace omezení reflektující provozní podmínky ZEVO a některé změny ve struktuře modelu kvůli korekční funkci. Jedná se o rozdílný zápis SOS1 proměnných pro ZEVO, které je nutné realizovat z důvodu zachování linearity při párování korekční funkce s dílčími kapacitami bez indexu  $k$ . Proto jsou jednotlivé kapacitní možnosti modelovány jako samostatné uzly, přičemž podmínka postavení pouze jedné kapacity je zohledněna za pomoci definovaného omezení vždy pro vybranou množinu uzlů umístěných v jednom bodě. To je zohledněno pomocí nerovnice (4.18), kde množina  $F$  obsahuje uvažovaná místa pro ZEVO a množina  $I_f^F$  zastupuje uzly představující příslušné kapacitní možnosti. Pro snížení počtu proměnných je pro všechny kapacitní možnosti vytvořen fiktivní uzel, na který jsou navázáni producenti. V opačném případě by bylo nutné vytvořit propojení mezi každou kapacitní možností a každým producentem, což by se negativně promítlo do počtu proměnných.

$$\sum_{i \in I_f^F} \delta_i \leq 1, \quad f \in F. \quad (4.18)$$

První dodatečné omezení zajišťuje, že ZEVO bude mít dostatečné množství odpadu vzhledem ke své kapacitě. V případě, že by bylo nutné spalovat směs s vyšší výhřevností odpadu, může být z pohledu provozních podmínek ovlivněno množství odpadu, které je možné spalovat. Cílem však je, aby zařízení spalovalo odpad v množství alespoň poloviny své roční kapacity. V opačném případě by již nebylo možné zajistit plynulý provoz zařízení. Jedná se o volitelný parametr  $\alpha$  v kontextu OH je předpokládáno využití dostupných kapacit na maximum s určitými provozními rezervami. Pro potřeby testovacích případových studií je nastavena tato hodnota jako limitní a podmínka je vyjádřena nerovnicemi (4.19).

$$0.5 \delta_i C_i \leq \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} M_{a,i} x_{a,o,s} \leq \delta_i C_i, \quad i \in I^E, s \in S. \quad (4.19)$$

Korekční funkce je modelována s využitím SOS2 proměnných, přičemž definiční obor funkce vyjadřuje rozdíl energie mezi plánovaným a skutečným (simulovaným) provozem. Tento rozdíl je popsán rovnicí (4.20), kde výraz  $H_{a,o,s} M_{a,i} x_{a,o,s}$  představuje simulovanou energii ve spalovaném odpadu, zatímco výraz  $Q_i^{REF} \delta_i C_i$  definuje plánovaný provoz. Parametr  $H_{a,o,s}$  zastupuje výhřevnost dané frakce odpadu a parametr  $Q_i^{REF}$  referenční (očekávanou) výhřevnost směsi při návrhu daného zařízení. Ve výsledku je tak získán rozdíl energie, který je možné následně promítnout do účelové funkce pomocí výrazu  $\sum_{k \in K} V_{i,k} w_{i,k,s}$ , kde parametr  $V_{i,k}$  reprezentuje obor hodnot korekční funkce.

$$\sum_{k \in K} U_{i,k} w_{i,k,s} = \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} H_{a,o,s} M_{a,i} x_{a,o,s} - Q_i^{REF} \delta_i C_i, \quad i \in I^E, s \in S. \quad (4.20)$$

Další uvažovaná omezení jsou vztažena k výhřevnosti spalovaného odpadu. Rošt spalovací komory je dimenzován na určitý rozsah výhřevnosti směsi, který je do modelu implementován pomocí nerovnic (4.21) a (4.22). Výraz  $H_{a,o,s}M_{a,i}x_{a,o,s}$  opět definuje energii odpadu na vstupu do zařízení, zatímco  $L_i^{MAX}M_{a,i}x_{a,o,s}$  charakterizuje maximální výhřevnost spalované směsi odpadu. V případě minimální výhřevnosti má nerovnice zohledněnou jinou hodnotu parametru určující výhřevnost a opačnou nerovnost.

$$\sum_{a \in A} \sum_{o \in O} H_{a,o,s} M_{a,i} x_{a,o,s} \leq \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} L_i^{MAX} M_{a,i} x_{a,o,s}, \quad i \in I^E, s \in S. \quad (4.21)$$

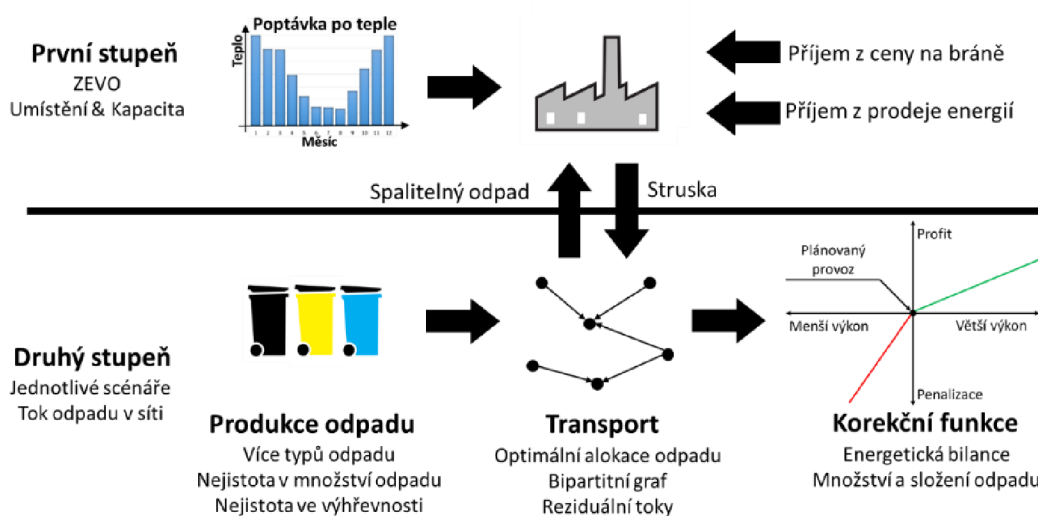
$$\sum_{a \in A} \sum_{o \in O} H_{a,o,s} M_{a,i} x_{a,o,s} \geq \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} L_i^{MIN} M_{a,i} x_{a,o,s}, \quad i \in I^E, s \in S. \quad (4.22)$$

Poslední dodatečným omezení oproti obecnému modelu je zohlednění přípustného rozsahu na množství celkové energie, kterou je možné získat při spalování odpadu. Za tímto účelem jsou do modelu implementovány nerovnice (4.23) a (4.24), kde výraz  $Q_i^{MAX} \delta_i C_i$  představuje maximální možnou energii. V případě dolního limitu je nerovnice obdobná s opačným znaménkem nerovnosti.

$$\sum_{a \in A} \sum_{o \in O} H_{a,o,s} M_{a,i} x_{a,o,s} \leq Q_i^{MAX} \delta_i C_i, \quad i \in I^E, s \in S. \quad (4.23)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{o \in O} H_{a,o,s} M_{a,i} x_{a,o,s} \geq Q_i^{MIN} \delta_i C_i, \quad i \in I^E, s \in S. \quad (4.24)$$

Zařazení matematického modelu se z pohledu dodatečným omezení oproti obecnému zápisu nezměnilo, tj. jedná se TS-MILP. Rozhodnutí v první stupni lze označit jako strategická rozhodnutí, která jsou zaměřena na umístění jednotlivých ZEVO a určení jejich kapacit. Označení strategická rozhodnutí vychází ze skutečnosti, že jimi nelze reagovat na aktuální vývoj, jelikož realizace projektů či jejich úprava trvá několik let. Druhý stupeň modelu zastupuje operativní rozhodnutí, která lze měnit v závislosti na aktuální situaci. Nejistota vyplývající z budoucího vývoje je vyjádřena ve formě scénářů, které představují různé modelové situace na základě predikčních modelů. Rozhodnutí se týkají alokace vhodného odpadu do jednotlivých zařízení při splnění provozních podmínek. Klíčové prvky modelovaných úkolů jsou znázorněny na Obr. 4.12. Celý zápis matematického modelu a následující případovou studii lze dohledat v článku autora [A9].



Obr. 4.12: Schéma dvojstupňového matematického modelu pro návrh infrastruktury ZEVO.



### 4.3.2 Případová studie

Přínos modelu je ověřen na motivační případové studii pro ČR s ohledem na více druhů odpadu vhodných pro energetické využití. Z pohledu vstupních proudů do technologie ZEVO je druhým nejvýznamnějším proudem objemný odpad (ObjO). Konkrétně jsou v této studii uvažovány toky SKO, ObjO a výmětů z třídících linek. Cílem optimalizace je minimalizace celkových nákladů na zpracování odpadu včetně zahrnutí penalizací (respektive zisků) za odchýlení se od provozních podmínek ZEVO. Předmětem řešení s ohledem na dobu výstavby ZEVO je stav OH v roce 2030, který může poskytnout vzhled do dané problematiky a poskytnout tak podporu pro plánování potřebné infrastruktury. Výpočet je realizován v detailu územního členění ORP. Vzhledem k nejistému vývoji budoucích podmínek, vládním opatřením a celkovému vývoji OH je bráno v úvahu několik různých scénářů, které se liší množstvím a výhřevností odpadu.

Základní scénář je odhadován podle predikce možného vývoje OH, která je prováděna na základě analýzy trendů z historických dat v jednotlivých regionech [B35]. Stejným způsobem se odhaduje výhřevnost SKO pro každou oblast podle jejího složení. Rezidua z recyklace jsou určena recyklační účinností v závislosti na míře separace, která je uvedena v kapitole 2.2. Každému regionu je tak přiřazena produkce každé frakce odpadu a její odpovídající výhřevnost. Vzhledem k nové legislativě, kde je zakázáno skládkovat odpad s větší výhřevností než 6,5 MJ/t, je uvažováno, že objemný odpad a rezidua z dotřídovacích linek není možné skládkovat a je nutné tyto odpady energeticky využít.

Vhodná umístění pro ZEVO jsou vybrána na základě technickoekonomického modelu, který reflektuje poptávku po teple za cílem dosažení vysoké účinnosti kogenerace tepla a elektřiny a následného prodeje. Pro případovou studii bylo navrženo 32 ORP s možností výstavby nového ZEVO a další čtyři již existující zařízení, které jsou rovněž zahrnuty do výpočtů. Podle technickoekonomického modelu [B106] je v každé lokalitě uvažováno pět různých kapacit s příslušným diagramem kotle a odpovídající korekční funkcí. Kapacitní možnosti jednotlivých regionů se také liší s ohledem na uplatnitelnost tepla.

Mezi další uvažovaná zařízení na zpracování patří skládky a cementárny. V případě skládek není řešena aktuální volná kapacita, zatímco cementárny jsou omezeny provozní kapacitou a mohou využít pouze vysoce výhřevný odpad, tj. pouze výměty z dotřídění odpadu. V ČR existuje pět stávajících cementáren a je uvažováno 110 skládek. Cementárny používají odpad jako palivo, takže z ekonomického hlediska se jedná o výhodné řešení a v modelu je tento typ zpracování bez poplatku. Nejméně preferovanou úpravou je skládkování, kde je cena nastavena dle platné legislativy ČR s příslušným skládkovacím poplatkem. Cementárny ani skládky nejsou mezi sebou v rámci lokalit cenově rozlišeny. Dále je uvažován reziduální tok odpadu po spalování ve formě strusky a popílku, jejíž množství se odhaduje na 25 % původního množství odpadu bez ohledu na jeho složení. Ve studii se uvažuje skládkování strusky bez nákladů za zpracování, jelikož strusku je možné využít na rekultivaci skládky, případně k potřebným povrchovým úpravám.

Ze základního scénáře budoucího vývoje lze odvodit dva směry. Jeden z nich odráží rychlejší plnění cílů recyklace, tj. bude pozorován výrazný pokles SKO a nárůst výmětu ze separovaného odpadu. Druhým směrem může být situace vyplývající z pandemie COVID-19, která je spojena s nárůstem produkce odpadu a snížení míry separace. Ve srovnání s předchozím případem jde o opačný směr toku materiálu. Tyto scénáře jsou konstruovány jako přesměrování jednotlivých materiálových toků z SKO na separované druhy odpadu, respektive ze separovaného odpadu na SKO. Změna od základního scénáře je nastavena na

30 %. Tyto scénáře jsou dále duplikovány s dalším omezením pro cementárny. Je nutné zahrnout případ, kdy cementárny nemohou přijímat všechny zbytkový odpad z recyklace. To může být způsobeno jak případnou odstávkou některých zařízení či využívání více průmyslového odpadu, který většinou poskytuje méně heterogenní směs odpadu a je tak pro cementárny upřednostňována před KO. Omezení je implementováno ve formě maximálního množství zpracovaných výmětů ve výši 50 % jejich produkce v základním scénáři. Další podmínkou je omezení skládkování, které je implementováno do základního scénáře. Toto omezení je v souladu s cíli EU a je modelováno podmínkou, že maximální skládkovaný KO je roven 10 % z jeho celkové produkce. Implementace do základního scénáře ve výsledku ovlivňuje i ostatní, jelikož musí existovat dostatečná kapacita pro energetické využití odpadu ve všech scénářích.

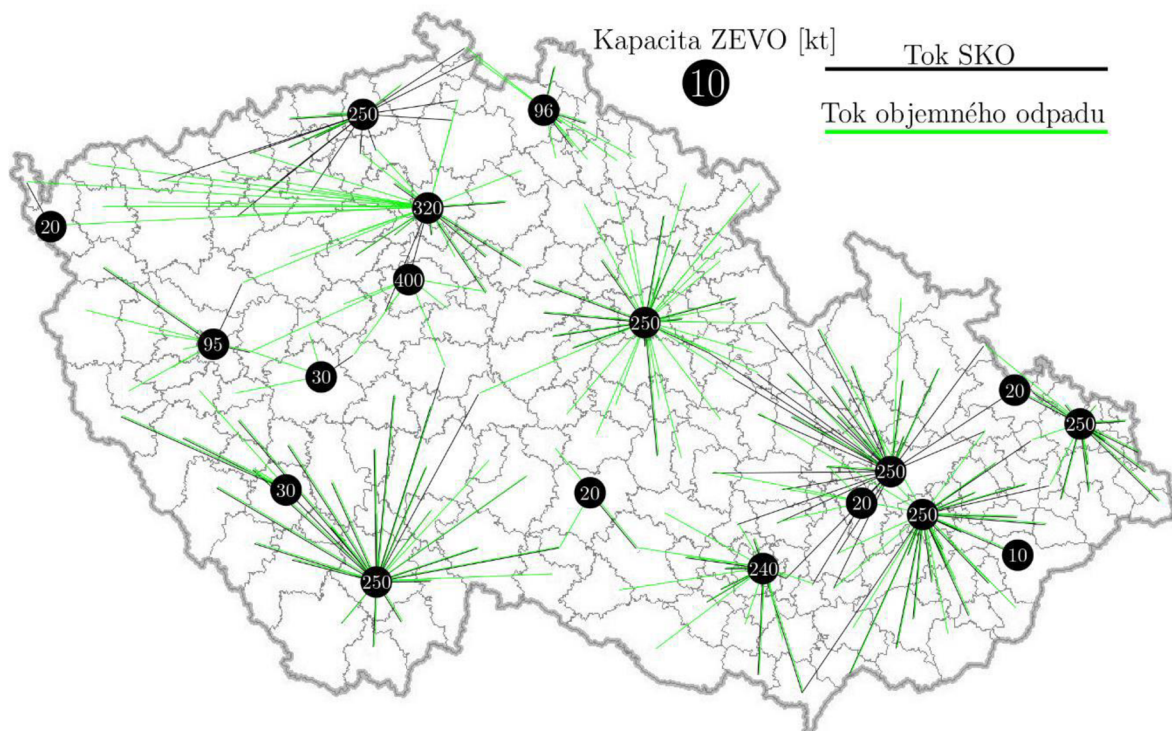
Celkem je ve výpočtu zohledněno šest scénářů. Produkce zahrnutých druhů odpadu v jednotlivých scénářích je uvedena v Tab. 4.1, kde je uvedena i uvažovaná pravděpodobnost scénářů. Základní scénář 1, respektive 4, je považován za nejpravděpodobnější, protože se jedná o predikci odhadovanou na základě historického vývoje produkce odpadu v ČR. Lze tedy předpokládat, že větší odchylka od těchto hodnot bude méně pravděpodobná. Následující výčet udává parametry týkající se velikosti modelu a výpočetní náročnosti. Je však nutno poznamenat, že v případě více odpadových proudů, detailnější sítě či více uvažovaných scénářů se může výpočetní čas výrazně zvýšit.

- Počet binárních proměnných = 180
- Počet proměnných SOS2 = 3 240
- Spojité proměnné = 143 461
- Výpočetní čas = 380 sekund
- Relativní chyba = 0 %.

Tab. 4.1: Popis jednotlivých scénářů pro návrh optimální infrastruktury ZEVO.

Scénář	Popis	SKO [kt]	ObjO [kt]	Výmět [kt]	Pravděpodobnost
1	Hlavní predikce Bez omezení cementáren Omezení skládkování	2 694	653	444	25 %
2	Větší separace 30 % Bez omezení cementáren	2 227	653	494	12,5 %
3	Ménší separace 30 % Bez omezení cementáren	3 549	653	267	12,5 %
4	Hlavní predikce 50% omezení cementáren	2 694	653	444	25 %
5	Větší separace 30 % 50% omezení cementáren	2 227	653	494	12,5 %
6	Ménší separace 30 % 50% omezení cementáren	3 549	653	267	12,5 %

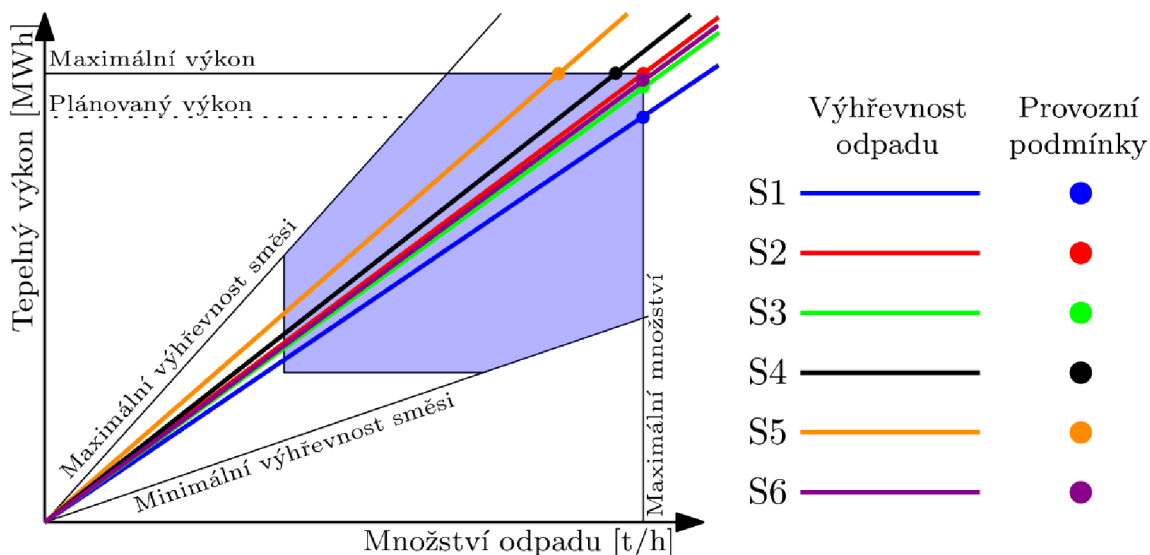
V následující části jsou podrobně komentovány výsledky případové studie. Lokalizace jednotlivých ZEVO je výsledkem prvního stupně stochastického modelu, který je platný pro každý scénář. Ve druhém stupni modelu jsou jednotlivé odpadové toky alokovány podle změny produkce a výhřevnosti odpadu tak, aby byl zajištěn provozní stav ZEVO. Na Obr. 4.13 je znázorněno rozmístění kapacit a oblastí svozu odpadu pro scénář 1.



Obr. 4.13: Výsledná infrastruktura ZEVO a odpovídající alokace odpadu v prvním scénáři.

Výpočet navrhuje výstavbu dalších 14 ZEVO s celkovou kapacitou 1 970 kt, které mají podpořit současné čtyři zařízení s kapacitami 400 kt, 240 kt, 96 kt a 95 kt. Z výsledků je patrné, že je snaha o využití zařízení s větší kapacitou, které nabízí lepší cenu za zpracování. Kapacitně menší ZEVO jsou navrhována z důvodu doplnění potřebné kapacity v místech, kde není výstavba velkého zařízení ekonomicky výhodná kvůli dostupnosti odpadu a s tím spojenou velkou dojezdovou vzdáleností. Zařízení s malou kapacitou naopak mají výhodu při uplatnění tepla, kdy ve většině případů lze veškerý výkon využít pro dodávku tepla. Z toků jednotlivých frakcí odpadu lze poznamenat, že v ZEVO jsou zpracovávány frakce hlavně SKO a ObjO. Reziduální odpad z recyklace se používá hlavně v cementárnách jako palivo. Část reziduí je však využívána pro energetické využití i v ZEVO v případě, že spalovaná směs odpadu má malou výhřevnost. Podmínkou je však krátká přepravní vzdálenost a nejčastěji je tak využíván pouze výmět v místě zařízení. V případě omezení cementáren ve scénářích 4, 5 a 6 jsou rezidua zpracována v ZEVO s větší mírou a tím významně ovlivněna výhřevnost spalované směsi, která má následně dopad na jejich provoz.

Celková kapacita ZEVO musí být dostatečná pro všechny scénáře, a proto je strategické rozhodnutí v první stupni matematického modelu ovlivněno zejména scénářem 1, který klade největší požadavky na energetické zpracování odpadu (omezení skládkování). V případě poklesu SKO ve scénářích 2 a 5 je dokonce k dispozici volná kapacita v některých ZEVO. Naopak ve scénářích 3 a 6 se skládá přebytečný odpad z regionů, které mají nejbližší ZEVO více vzdálené. Výhřevnost spalované směsi v ZEVO se mezi scénáři liší a obecně je patrná snaha udržet dostatečně výhřevnou směs, pokud existuje v okolí zařízení dostatek vhodného odpadu. Model cílí zejména na maximální využití dostupné kapacity s největší možnou přípustnou výhřevností, při které ještě není nutné snižovat množství zpracovávaného odpadu. Na druhou stranu, pokud musí být zpracovávány v ZEVO ve větší míře výměty z recyklace, může výhřevnost překročit povolený limit. Příkladem je zařízení s kapacitou 250 kt nacházející se v Ústí nad Labem. Příslušný diagram kotle je znázorněn na Obr. 4.14.



Obr. 4.14: Diagram kotle pro navrhnuté ZEVO v Ústí nad Labem.

Modrá oblast na Obr. 4.14 představuje povolené provozní podmínky. Provoz ZEVO se většinou nachází v pravém horním rohu přípustné oblasti, kde směs disponuje dobrým energetickým potenciálem a zároveň může zařízení využívat svou maximální zpracovatelskou kapacitu. Problém nastává ve scénářích 4 a 5, kde výhřevnost směsi je již příliš vysoká na to, aby zařízení mohlo zpracovat plánované množství odpadu. Proto je nutné nezpracovaný odpad přesměrovat do jiných zařízení, což se promítne do ekonomické bilance tohoto zařízení. Tyto závislosti byly v modelu zohledněny a sledovány ve formě:

- Korekční funkce, která popisuje rozdíly v příjmech z prodeje tepla a elektřiny.
- Ztrát z nevyužité kapacity, které reflektují rozdíly v příjmech z poplatku za zpracování odpadu.

Případným řešením je pro dané zařízení upravit diagram kotle a v rámci úprav provozu připravit zařízení na spalování výhřevnějšího odpadu. Dále jsou podrobně analyzovány jednotlivé složky nákladů a jejich podíl na celkovém řešení každého scénáře. Tab. 4.2 ukazuje jednotlivé části účelové funkce a jejich relativní podíl na celkových nákladech.

Tab. 4.2: Podíl jednotlivých složek na účelové funkci nalezeného řešení.

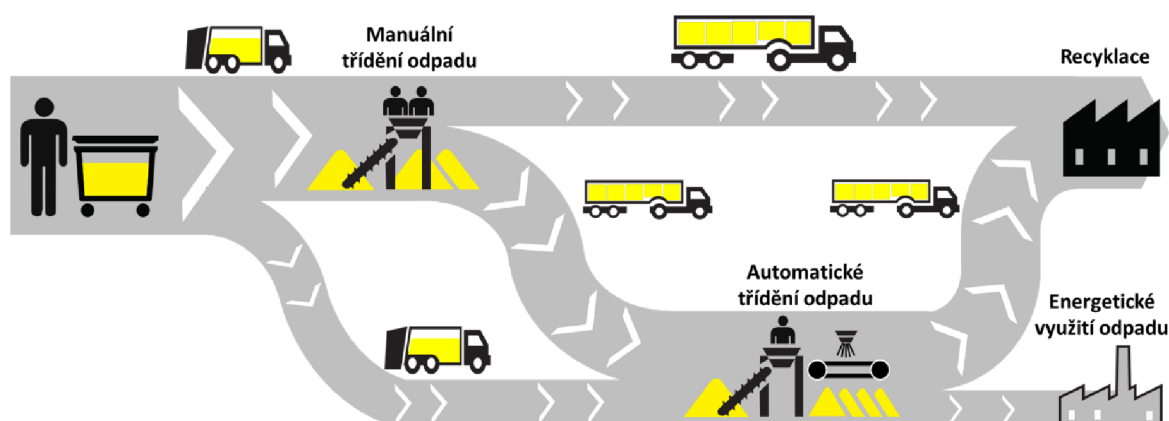
Scénář	Investice do ZEVO [mil. EUR]	Skládkovací poplatek [mil. EUR]	Transportní náklady [mil. EUR]	Korekční funkce [mil. EUR]	Ztráty z nevyužité kapacity [mil. EUR]
1	304 / 81,0 %	38 / 10,1 %	43 / 11,5 %	-10 / -2,7 %	0 / 0,0 %
2	304 / 89,7 %	17 / 5,0 %	34 / 10,1 %	-16 / -4,8 %	0 / 0,0 %
3	304 / 72,9 %	97 / 23,3 %	32 / 7,6 %	-16 / -3,8 %	0 / 0,0 %
4	304 / 81,2 %	56 / 14,9 %	31 / 8,2 %	-16 / -4,3 %	4 / 1,1 %
5	304 / 86,1 %	34 / 9,6 %	31 / 8,8 %	-16 / -4,6 %	16 / 4,5 %
6	304 / 73,2 %	100 / 24,2 %	27 / 6,5 %	-16 / -3,9 %	0 / 0,0 %

Uvedené hodnoty ukazují, že největší náklady jsou na zpracování odpadu v ZEVO, což vzhledem celkové dostupné kapacitě 2801 kt a podílu na zpracování veškerého vyprodukovaného odpadu je opodstatněné. Vhodným umístěním ZEVO v rámci zkoumaného území může model patřičně snížit náklady na dopravu. Výsledkem je, že doprava představuje pouze 6 až 11 % celkových nákladů v závislosti na množství odpadu.

Korekční funkce upravující zisky z prodeje energií je ve všech scénářích záporná. V průměru tedy všechna navrhovaná ZEVO využívají směs odpadu s vyšší výhřevností, než byla plánovaná hodnota v technickoekonomickém modelu a byl tak realizován větší zisk z prodeje tepla a elektřiny. V procentuálním vyjádření se nejedná o velké hodnoty, avšak roční zvýšení příjmů o 4 % značně zvýší návratnost investic, což může podpořit vybrané projekty. Důležitým výstupem jsou však zejména ztráty v důsledku nevyužití kapacity. Jedná se o nerealizované zisky ze zpracování odpadu způsobené příliš vysokou výhřevností spalované směsi. Při hodnocení systému jako celku se nejedná o velké rozdíly a ztráty jsou kompenzovány vyššími zisky z prodeje energií. V tomto ohledu je však nutné posuzovat jednotlivé projekty zvlášť, kdy mohou ztráty dosahovat až 15 % ve scénáři 4 a 21 % ve scénáři 5. Takové zásahy do ekonomické bilance zařízení již představují značný problém v udržitelnosti ZEVO a je nutné vhodně reagovat například navýšením ceny za zpracování odpadu, jelikož patrně se budou do zařízení dostávat výhřevné složky odpadu. Získané informace o vlivu výhřevnosti odpadu na provoz zařízení lze využít pro změny vstupů v případě iteračního výpočtu. Může tak být vhodně upraven technickoekonomický model a navrhnout odpovídající spalovací kotel s jiným diagramem.

#### 4.4 Infrastruktura pro dotřídění plastů

Kapitola 4.2 týkající matematického modelu optimální míry separace nastínila potřebu modelovat proud plastového odpadu ve větším detailu. Rozdělení na dílčí plastové frakce může být klíčové při rozhodnutích a budování potřebné infrastruktury. V současnosti se navíc do popředí dostávají stále pokročilejší technologie umožňující automatizaci procesu dotřídění, což může přinést větší efektivitu a nižší náklady. Investiční náklady pro takové projekty jsou však obrovské a v porovnání s lokálními ručními dotříděvacími linkami mohou být profitabilní pouze v případě většího množství zpracovávaného odpadu. To na druhou stranu klade nároky na dopravní vzdálenosti, kdy převoz konkrétně plastů je velice neefektivní kvůli nízké sytné hmotnosti a většina převáženého objemu tak tvoří vzduch. Pro zajištění efektivního fungování komplexního zpracovatelského řetězce je však třeba zvažovat různé konfigurace dílčích subsystémů a vhodně provést integraci technologických zařízení do systému jako celku. Navrhovaná struktura zpracovatelského řetězce je znázorněna na Obr. 4.15.



Obr. 4.15: Struktura zpracování plastového odpadu po integraci automatizovaných linek.

Základní myšlenka systému je postavená na maximálním využití současné infrastruktury ručních třídících linek. Ty mohou být doplněny o vhodně lokalizovaná a nadimenzovaná moderní automatická centra, která pomohou s dotříděním těžko rozpoznatelné části odpadu. V rámci ručního třídění mohou být separovány zejména PET lahve a velké dobře uchopitelné

tvrdé plasty. Zbývající část může být následně převezena k automatickému dotřídění. Vytríděný odpad vhodný k materiálovému využití bude následně transportován k další úpravě spojené s recyklací, zatímco výmět (materiálově nevyužitelný odpad) předán k energetickému využití. S ohledem na definované milníky pro recyklaci odpadu je cílem minimalizovat environmentální dopady, respektive maximalizovat benefity (úsporu emisí) plynoucí z druhotného materiálu. Zároveň je však třeba plánovat investice efektivně a nedisponovat předimenzovanou infrastrukturou za účelem získání maxima materiálu s finančně neudržitelným systémem. Rozdíl optimalizace oproti kapitole 4.2 spočívá v zahrnutí neurčitosti budoucí produkce plastů (míry separace), která bude implementována ve formě scénářů. Ve výsledku tak není řešena optimální míra separace a cílem je navrhnout optimální systém ručních a automatizovaných třídících linek, který bude efektivní vzhledem k definované nejistotě budoucího vývoje.

#### 4.4.1 Matematický aparát

Využívaný matematický model opět kopíruje obecnou definici v kapitole 4.1. Změna modelu nastává jen v případě účelové funkce, kde navíc vystupuje člen zohledňující benefity plynoucí z využívání sekundárního materiálu. Jak již bylo uvedeno v obecném modelu, rovnici pro tvorbu reziduí lze aplikovat také pro definici využitelného odpadu. Ve výsledku lze tedy definovat pro dotřídění odpadu následující dvojici omezení:

$$R_{i,o,s} = \sum_{a \in A} \sum_{oo \in O} B_{i,o,oo} M_{a,i} x_{a,oo,s}, \quad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall s \in S. \quad (4.25)$$

$$D_{i,o,s} = \sum_{a \in A} \sum_{oo \in O} (1 - B_{i,o,oo}) M_{a,i} x_{a,oo,s}, \quad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall s \in S. \quad (4.26)$$

Rovnice (4.25) definuje množství reziduálního odpadu  $R_{i,o,s}$ , které je nutné dále zpracovat a je nutné ho převést do jiné technologie. V případě manuálních linek je možné odpad dále převést do automatických, které mohou z odpadu získat další materiál. Vytríděný materiál  $D_{i,o,s}$  je definován pomocí rovnice (4.26) jako doplněk do 100 %. Tyto rovnice však lze uvažovat pouze v případě, že lze očekávat rovnost vstupních a výstupních proudů. V opačném případě je nutné pro získaný materiál definovat novou matici koeficientů  $B_{i,o,oo}$ .

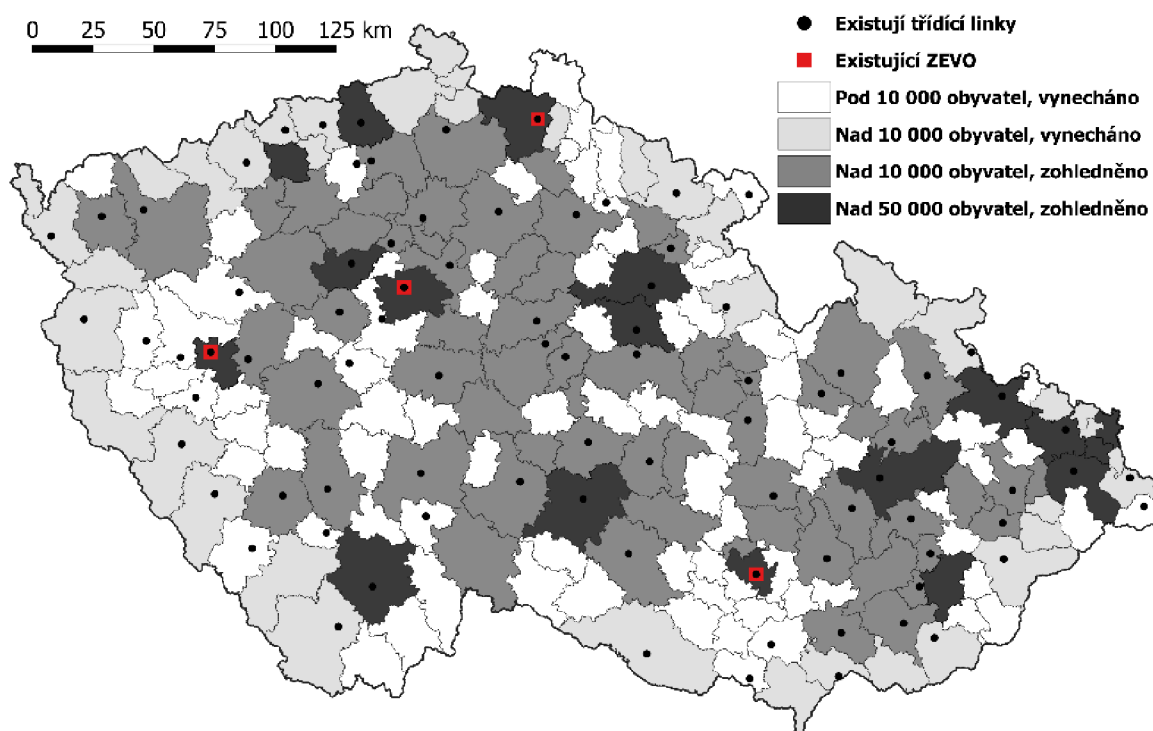
Účelová funkce optimalizační úlohy obsahuje obě kritéria, jejichž vliv je řízen parametrem  $\lambda$ . Jednotlivá kritéria zohledňují transport odpadu, provoz manuální třídících linek, investice a provoz automatizovaných center a zmíněný zisk sekundárních materiálů z recyklace. Optimalizační model je doplněn o omezení zajišťující hmotnostní bilance, účinnost třídění v jednotlivých zařízeních a tvorbu zbytkových odpadů. Doplnující informace a kompletní model včetně navazující případové studie lze dohledat v publikaci autora této dizertační práce [A10].

#### 4.4.2 Případová studie

Řešená případová studie řeší představený optimalizační problém pro ČR v detailu ORP, zejména z důvodu dostupnosti dat týkající se produkce odpadů a předpokládané časové náročnosti výpočtu. Cílem je vhodně lokalizovat nové kapacity pro efektivní třídění plastového odpadu, které budou využívat nejmodernější technologie umožňující maximální automatizaci procesu. S ohledem na zvýšení efektivity celého systému jsou však do výpočtu také zahrnuty všechny existující ruční třídící linky, které mohou významně snížit náklady na

dopravu plastu. V uvažovaném detailu je zohledněno 86 ORP s ruční dotřídovací linkou, kdy v případě dvou nebo více zařízení jsou agregovány do jednoho.

Případová studie zohledňuje pouze 84 potenciálních míst pro výstavbu nových automatizovaných třídících center. Původní počet 206 uzlů je omezen z důvodu snížení výpočtové náročnosti a výběr je realizován na základě výhodné pozice v rámci ČR a počtu obyvatel. Lze předpokládat implementaci pouze několika zařízení umístěných zejména do míst s vysokou produkcí, případně tak, aby pokryly široké okolí. Proto jsou vynechány ORP s malým počtem obyvatel, stejně jako příhraniční oblasti. Všechny uvažované zařízení včetně potenciálních ORP pro výstavbu jsou znázorněny na Obr. 4.16. Zařízení pro následnou recyklaci odpadu nejsou v této případové studii zahrnuti kvůli jejich velkému počtu a rovnoměrnému rozložení v ČR. Jejich vliv na strategická rozhodnutí tak lze považovat za zanedbatelný.

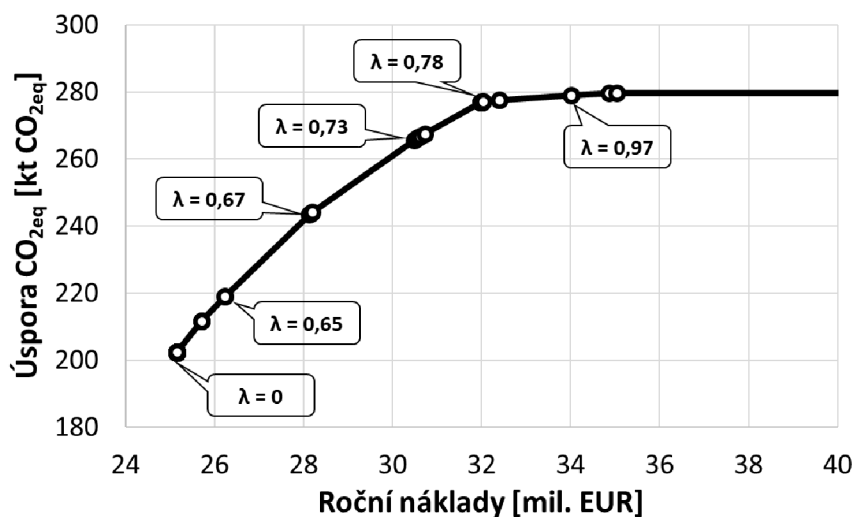


Obr. 4.16: Existující infrastruktura pro zpracování plastů a uvažované regiony pro automatizovaná třídící centra.

Cílem optimalizace je najít kompromis mezi environmentální složkou a finanční udržitelností systému. V rámci vícekritériální optimalizace není možné jednoznačně definovat optimum a vzniká pouze sada optimálních řešení pro různá nastavení vlivu jednotlivých kritérií. Výběr konkrétního lambda je tedy založeno na expertním odhadu a na očekávaných dopadech výsledku optimalizace na celý systém. Pro výběr vhodného scénáře je tak využita následující myšlenka:

Cílem je maximalizovat úsporu emisí, získat co nejvíce sekundárního materiálu a plnit tak zavazující cíle plynoucí z legislativy EU. Bez ohledu na náklady by bylo modelem doporučeno realizovat desítky třídících center, což je v rozporu s finanční udržitelností. Klíčové je tedy vybrat takový případ, kdy snížení nákladů vede k velkému úbytku zpětně získaného plastu, zatímco další navyšování investic již nevede k významné úspoře emisí.

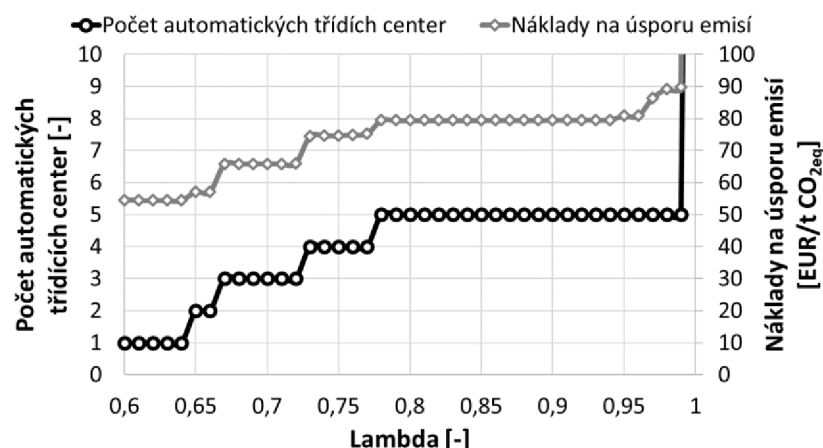
Za účelem nalezení takového řešení je nutné sledovat poměr mezi náklady na systém a úsporami emisí. Parametr  $\lambda$  reprezentuje vliv environmentálního aspektu na výsledné řešení a jeho hodnota se pohybuje v rozmezí [0; 1]. Pro definovanou sadu vstupních parametrů byly provedeny výpočty s různými hodnotami  $\lambda$  (přípustný interval s krokem 0,01) za účelem analyzovat vliv jednotlivých kritérií. Z důvodu výpočetní náročnosti je výběr kompromisu mezi sledovanými kritérii realizován na základě optimalizace jednoho scénáře. Výsledky výpočtů lze zaznamenat do grafu tvořící Paretoův diagram, jenž reprezentují tzv. pareto optimální řešení (tj. nelze dosáhnout zlepšení jednoho kritéria, aniž by bylo zhoršeno druhé). Diagram je znázorněn na Obr. 4.17.



Obr. 4.17: Pareto optimální řešení pro infrastrukturu zpracování plastů.

Graf na Obr. 4.17 je úzce spojen s Obr. 4.18, který ukazuje závislost počtu automatických třídících center na parametru  $\lambda$  včetně vyhodnocení nákladů na úsporu tuny CO<sub>2eq</sub>. Každý bod reprezentuje řešení pro jednu hodnotu parametru  $\lambda$ , zatímco některé z nich se mohou na Obr. 4.17 překrývat. Výsledky optimalizace ukazují, že už jedno třídící centrum má přínos i z finančního hlediska. Toto nastavení zůstává stejné až do  $\lambda = 0,64$ , které vede k úspoře emisí kolem 200 kt CO<sub>2eq</sub> ve srovnání pouze s energetickým zpracováním. V tomto případě je 49 % odděleně sbíraného plastového odpadu separováno a určeno k materiálovému zpracování. Samotná existující infrastruktura ručních dotřídovacích linek dosahuje pouze 44 %. Tendence implementovat nová automatizovaná centra roste s rostoucím důrazem na ekologii. Při nízkém počtu automatizovaných třídících center představují tato zařízení pouze mírný nárůst celkových nákladů, protože je lze umístit ve městech s největší produkcí odpadu a lze tak využít jejich maximálních kapacit. Větší počet než 5 třídících center již není výhodný, protože pro dosažení jejich plného provozního potenciálu je vyžadována přeprava na dlouhé vzdálenosti, což je velmi nákladné i v případě přepravy lisovaných plastů pomocí nákladní dopravy.





Obr. 4.18: Počet automatizovaných center a náklady na úsporu emisí vzhledem k parametru lambda.

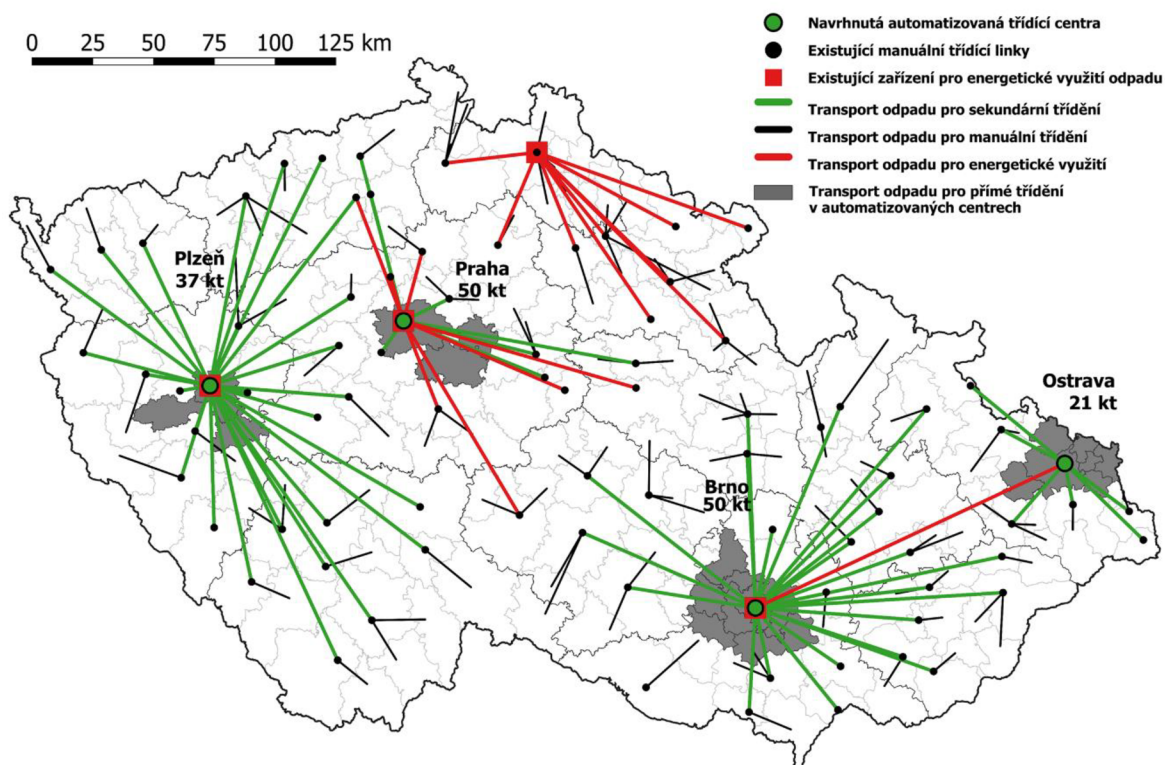
Obr. 4.18 také zobrazuje závislost jednotkové ceny za tunu uspořené  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  s ohledem na parametr  $\lambda$ . Tento ukazatel nezahrnuje náklady spojené s energetickým zpracováním plastů, neboť cílem je zhodnotit přínos recyklačního systému ve srovnání s pouhým energetickým zpracováním. Z grafu je patrné, že každé další automatizované třídící centrum snižuje ekonomickou efektivitu systému. Maximální úspory emisí lze dosáhnout vybudováním 74 nových zařízení. Tento scénář však není znázorněn, neboť jednotková cena za ušetření tuny  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  přesahuje 1 500 EUR, což lze považovat za řešení mimo realitu. Jako optimální řešení je vybrán případ, kdy  $\lambda = 0.78$ . Z předchozích obrázků je patrné, že v tomto bodě je dosažena téměř maximální úspora emisí, tj. je dosažena téměř maximální možná recyklace. Snížením investic by však docházelo k menšímu množství vytríděného plastu. Toto řešení představuje celkové roční náklady ve výši 32 mil. EUR a úspory emisí ve výši 277 kt  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  při jednotkových nákladech 79,4 EUR za tunu  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ . Aktuální průměrná cena emisních povolenek v roce 2022 podporuje volbu tohoto scénáře, jejíž hodnota se pohybuje okolo 80 EUR/t  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  [B107].

Poznatky získané při výběru optimálního parametru  $\lambda$  byly dále využity jako analýza citlivosti. Byly takto identifikované parametry systému, které významně ovlivňují návrh celého řetězce. Jedná se zejména o množství odpadu, účinnost třídění a složení plastového odpadu (PET, HDPE, aj.). Jako klíčový byl identifikován podíl odpadu, který není možné vytrítit či dále recyklovat. Díky těmto informacím bylo definováno dalších 23 scénářů možného vývoje v následujících letech, které při optimalizaci byly zohledněny pro získání robustního řešení. V rámci urychlení řešení a získání optimálního řešení byl počet automatizovaných třídících center omezen na hodnotu 5. Při konstrukci scénářů a citlivostní analýzy, matematický model nikdy nedoporučil více než 5 automatizovaných třídících center. Vzhledem ke skutečnosti, že je optimalizována průměrná hodnota ze všech scénářů, lze tímto omezením výrazně snížit výpočetní čas, jelikož prohledávání stromu přípustných řešení obsahuje pouze zlomek původních kombinací, které je nutné vyhodnotit. Výsledné parametry výpočtů jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Porovnání parametrů modelů při různém nastavení scénářů.

	Jeden scénář	24 scénářů omezeno	24 scénářů neomezeno
Počet rovnic	3 901	87 898	87 897
Počet proměnných	25 275	595 215	595 215
Výpočetní čas	32s	3h 3m 42s	10h
Relative gap	0 %	0 %	5 %

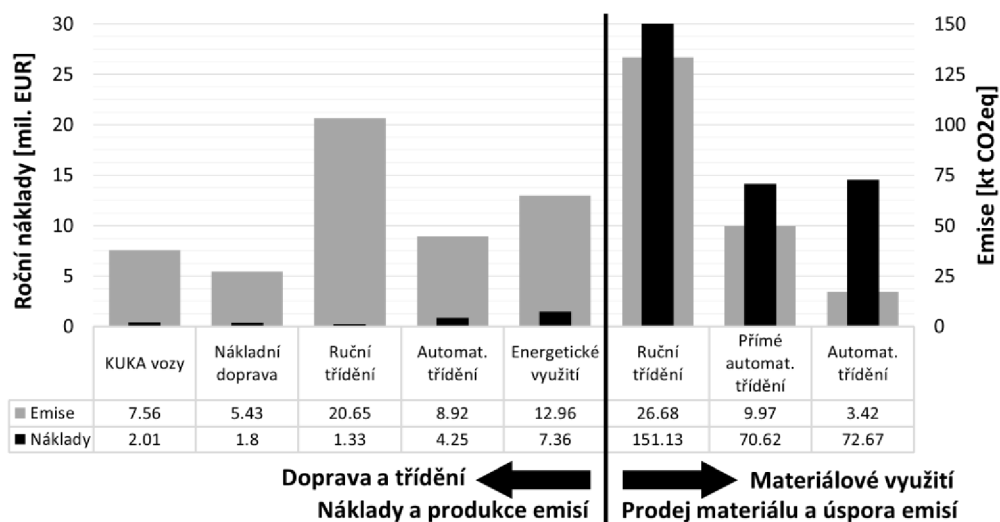
Výstupem vyvinutého nástroje je návrh optimální zpracovatelské infrastruktury, která by měla být dlouhodobě finančně udržitelná a zvýšit recyklaci v případě jakéhokoliv modelovaného scénáře. Optimalizační výpočty navrhuji jako řešení výstavbu 4 zařízení pro automatické třídění plastů s celkovou kapacitou 158 kt ročně. Výsledné toky odpadu pro základní scénář a návrh nových automatizovaných center jsou zobrazeny na Obr. 4.19.



Obr. 4.19: Navrhnutá infrastruktura pro zpracování plastů včetně toků odpadu.

Na první pohled je zjevná tendence umísťovat automatizovaná centra do míst s vysokou koncentrací odpadu, zejména v případě Prahy, Brna a Ostravy (tři největší města v ČR). Následně je výhodné umístit třídící centra do měst s již existujícím ZEVO. Zde je však také nutné posoudit celý dodavatelský řetězec a dostupnost odpadu, jelikož třídící centrum je doporučeno pouze pro Plzeň, která má výhodnou polohu a zajišťuje zpracování odpadu ze západních Čech. Při zohlednění více scénářů již není doporučena výstavba automatického třídícího centra v Liberci, která byla navržena pro základní scénář, jelikož neurčitost v rámci některých parametrů je vyhodnocena pro provoz nepříznivě.

V rámci optimalizačních výpočtů je zjevné úsilí optimalizovat náklady spojené s dopravou, tj. preferováno je ruční dotřídění odpadu i přesto, že dochází ke dvojitému třídění určité části plastů. Existující infrastruktura snižuje množství přepravovaného odpadu na větší vzdálenost. Část produkce, zejména ze širšího okolí, je přepravována přímo do třídících center, čímž je možné eliminovat mezikrok v podobě ručního předtřídění odpadu a zároveň úspora v dopravě zde již není významná. Přímé zpracování v nových zařízeních je hodnoceno jako výhodné až do vzdálenosti 40 km. Důležitou částí analýzy výsledků je také vyhodnocení jednotlivých částí účelové funkce a jejich příspěvku k jednotlivým kritériím. Konkrétní hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 4.20.



Obr. 4.20: Podíl jednotlivých složek v účelové funkci.

Na první pohled jsou výhody recyklace zřejmé, zejména z hlediska ekologie, kde benefity získané z recyklace materiálu značně převyšují produkci emisí spojenou s provozem. Z grafu dále vyplývá, že v případě zohlednění dopravy a ručního dotřídění se systém nachází těsně pod hranicí ekonomické udržitelnosti (náklady jsou rovny zisku z prodeje). Automatizovaná třídící centra výrazně zvyšují benefity z recyklace materiálu, avšak jejich výhodnost je z ekonomického pohledu s narůstajícím počtem zařízení menší. V rámci integrace nových automatizovaných center je však možné optimalizovat zejména náklady za dopravu díky jejich vhodné lokalizaci.

Další analýza je věnována toku jednotlivých typů plastů. Nejhodnotnější komodity plastu jsou ve většině případů tříděny ručně, což odpovídá jejich následnému prodeji za cenu převyšující provozní náklady. PET láhve představují žádanou komoditu na trhu s druhotnými surovinami. Odpad zpracovává všech 82 ručních třídících linek s celkovým množstvím odpadu 214 kt. Celkově je 34 % plastů určených k recyklaci získáno ručním dotříděním a dalších 27 % se separuje v automatických zařízeních, přičemž 14 % odpovídá přímému třídění a dalších 13 % je získáno druhotným dotříděním reziduí z ručních linek. Materiálové využití plastů tak oproti původní infrastruktuře zahrnující jen ruční linky 44 % dosahuje hodnoty 61,2 %, přičemž zbytek plastů je určen k energetickému využití.

#### 4.5 Vyhodnocení dostatečnosti kapacit

Jednou z aplikací tokových úloh v rámci dopravní sítě může být vyhodnocení dostupných kapacit. Jedná se o alokační úlohu, kde není cílem najít optimální místo pro případné nové zpracovatelské zařízení, ale pouze získat přehled o tom, které regiony jsou z pohledu zpracování vlastní produkce soběstačné. Cílem je tak identifikovat oblasti, kde nejsou k dispozici adekvátní technologie a odpad musí proto být transportován desítky až stovky kilometrů napříč celým územím. Takové výsledky mohou sloužit jako podpůrný podklad pro další plánování a definici navazujících optimalizačních úloh pro správné umístění a výběr zařízení. Současně může model i simulovat různé scénáře navýšení kapacit, na základě kterých lze vyhodnotit budoucí chování systému.

### 4.5.1 Matematický aparát

Výhodou podobných úloh je jejich jednoduchost, kdy optimalizační úloha se skládá pouze z účelové funkce a kapacitního omezení. V případě uvažovaného systému a vyhodnocení jsou všechny části matematického modelu lineární. To zaručuje právě dobrou řešitelnost několika frakcí odpadu najednou ve velkém detailu včetně garance optimálního řešení. Matematický model je koncipován pro vyhodnocení dostupnosti kapacit pro nebezpečný odpad, který má určitá specifika týkající se podmínek zpracování. Z expertního pohledu je klíčové implementovat preferenci některých toků, avšak s ohledem na vzdálenost do zpracovatelského zařízení. Současně dochází k tvorbě reziduálních toků, se kterými je nutné dále adekvátně nakládat.

Účelová funkce, která je uvedena v rovnici (4.27), modelu obsahuje pouze dva členy. První část  $V_{a,o}x_{a,o}$  je vztažena k nákladům na přepravu odpadu, zatímco druhý člen  $K_{a,o}x_{a,o}$  představuje preferované zpracování jednotlivých typů odpadu v uvažovaných technologiích. Jelikož není cílem modelu vyhodnocovat ekonomiku systému, není nutné zohledňovat náklady na zpracování odpadu. Preference je navázána na hrany z toho důvodu, že příslušné koeficienty je žádoucí měnit i s ohledem na vzdálenost, což by v případě implementace do uzlu zpracování nebylo možné postihnout. Definice příslušných koeficientů je předmětem případové studie v kapitole 4.5.2.

$$\sum_{a \in A} \sum_{o \in O} V_{a,o} x_{a,o} + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} K_{a,o} x_{a,o} \quad (4.27)$$

Omezení matematického modelu se skládají pouze z rovnice zajišťující tvorbu reziduí po zpracování, kapacitní omezení a nezápornost proměnných, které jsou v tomto případě pouze toky odpadů  $x_{a,o}$ . Z konstrukce modelu je patrné, že se tedy jedná o lineární jednokriteriální model bez celočíselných proměnných. To zajišťuje právě již zmiňovanou dobrou řešitelnost, obvykle v řádu několika sekund či minut. Větší limitaci zde představují nároky na paměť. Konkrétní detaily matematického modelu i následující případové studie lze dohledat v [A11].

### 4.5.2 Případová studie

Model byl aplikován pro vyhodnocení dostatečnosti kapacit pro zpracování nebezpečného odpadu (NO) v ČR, kterého bylo od roku 2009 do roku 2018 produkováno 1,504 až 1,768 milionů tun ročně odpadu. Produkce NO je rozdělena do osmi kategorií, tzv. toků, které pokrývají 373 kódů katalogu odpadů s označením nebezpečný registrovaných v ČR. Toky, které jsou zahrnuty do výpočtu, jsou charakterizovány potenciální metodou zpracování. Výčet toků včetně množství odpadu v jednotlivých letech je k dispozici v Tab. 4.4. Data týkající se množství odpadu jsou získána z databáze ISOH [B13], která obsahuje údaje o produkci a nakládání s odpadem na území ČR podle odpadového katalogu. Predikce budoucí produkce odpadu je realizována s využitím matematického modelu prezentovaném v [B35].

Tab. 4.4: Přehled definovaných toků nebezpečného odpadu a odpovídající produkce.

<b>Tok NO</b>	<b>2018</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2035</b>
Spalování	83 140	84 049	90 799	97 096
Deemulzifikace	0	2	2	2
Biodegradace	323	1 192	1 140	1 063
Stabilizace	166 829	153 502	151 599	150 496
Spalování nebo stabilizace	86 097	88 487	94 650	100 283
Deemulzifikace nebo stabilizace	83 721	101 307	110 615	118 732
Neutralizace nebo stabilizace	45 553	44 130	46 148	48 132
Biodegradace nebo stabilizace	572 249	410 685	379 229	344 630
<b>Celkem</b>	<b>1 037 912</b>	<b>883 354</b>	<b>874 182</b>	<b>860 434</b>

Dle predikčního modelu a trendu v datech, celkové množství produkovaného NO v budoucnu klesá. Na druhou stranu dílčí toky ukazují různý vývoj a dostatečnost kapacit tak musí být vyhodnocena zvlášť (včetně vazeb plynoucích z reziduálního odpadu). Vyhodnocení dostatečnosti kapacit je aplikováno na predikci pro rok 2030. Do výpočtů dále vstupuje stávající kapacita zpracovatelských zařízení [B108]. Vzhledem k tomu, že výpočet je postaven na administrativním dělení na úrovni ORP (206 uzlů), tak pokud v jednom ORP je přítomno více než jedno zařízení stejného typu, jsou tato zařízení sloučena do jednoho a roční kapacita je sečtena. Do výpočtu vstupují následující zařízení:

- Spalovny NO: 23 zařízení s celkovou kapacitou 117 004 tun/rok.
- Deemulzifikace a neutralizace: 40 zařízení s celkovou kapacitou 547 907 tun/rok.
- Biodegradace: 84 zařízení s celkovou kapacitou 2 667 525 tun/rok.
- Stabilizace (solidifikace): 11 zařízení s celkovou kapacitou 292 000 tun/rok.
- Skládky NO: Nejsou zahrnuty do vyhodnocení kvůli dostatečným kapacitám a snaze eliminovat tento typ zpracování.

V rámci optimalizace jsou zohledněny i reziduální toky odpadu z jednotlivých typů zpracování. Konkrétní parametry reziduálních toků ze zpracování jsou uvedeny v Tab. 4.5. Hodnota podílu reziduálního odpadu je vztažena k hmotnosti zpracovávaného odpadu na vstupu do zařízení.

Tab. 4.5: Parametry zbytkového odpadu u jednotlivých typů zpracování

<b>Typ zpracování</b>	<b>Zbytkový odpad</b>	<b>Podíl reziduálního odpadu</b>	<b>Přípustné zpracování zbytkového odpadu</b>
Spalování	Struska	20	Skládka
Spalování	Popílek	5	Stabilizace
Deemulzifikace	Odpadní kal	5	Biodegradace nebo stabilizace
Neutralizace	Neutralizovaný kal	5	Stabilizace
Biodegradace	Spalitelný plyn	5	Spalování
Biodegradace	Kompost	65	Skládka
Stabilizace	Stabilizovaný odpad	70	Skládka ostatní
Stabilizace	NO	70	Skládka NO

S ohledem na matematický model je nutné definovat hierarchii zpracování dle ekologických kritérií, které odráží preference mezi zařízeními. Následující výčet přiřazuje jednotlivým zařízením koeficient  $K$ , který je následně využit také v účelové funkci:

- Spalování NO,  $K = 1$
- Deemulzifikace či neutralizace odpadních vod,  $K = 100$
- Stabilizace,  $K = 10\ 000$
- Skládkování ostatního odpadu,  $K = 1\ 000\ 000$
- Skládkování nebezpečného odpadu,  $K = 1\ 000\ 000$ .

Současně je preferováno zpracování odpadu v blízkosti produkce i přes nepreferovaný typ zpracování, proto jsou uvedené hodnoty modifikovány dle vzdálenosti do daného zařízení. Úprava tohoto koeficientu je uvedena v Tab. 4.6. Skládky zde nejsou uvedeny, jelikož jejich původní hodnota koeficientu  $K$  už dosahuje potřebné velikosti, která se snaží minimalizovat tento typ zpracování. Díky této úpravě koeficientu dochází k efektu, kdy nad 100 km neexistuje mezi zařízeními preference (vyjma skládek), avšak může být přihlédnuto k tvorbě reziduálního odpadu.

Tab. 4.6: Přehled koeficientů pro zpracování v účelové funkci.

Typ NO	Spalování		Deemulzifikace		Neutralizace		Biodegradace		Stabilizace	
	<100 km	>100 km	<100 km	>100 km	<100 km	>100 km	<100 km	>100 km	<100 km	>100 km
Spalování	1	10 000	-	-	-	-	-	-	-	-
Deemulzifikace	-	-	100	10 000	-	-	-	-	-	-
Biodegradace	-	-	-	-	-	-	100	10 000	-	-
Stabilizace	-	-	-	-	-	-	-	-	10 000	10 000
Spalování nebo stabilizace	1	10 000	-	-	-	-	-	-	10 000	10 000
Deemulzifikace nebo stabilizace	-	-	100	10 000	-	-	-	-	10 000	10 000
Neutralizace nebo stabilizace	-	-	-	-	100	10 000	-	-	10 000	10 000
Biodegradace nebo stabilizace	-	-	-	-	-	-	100	10 000	10 000	10 000

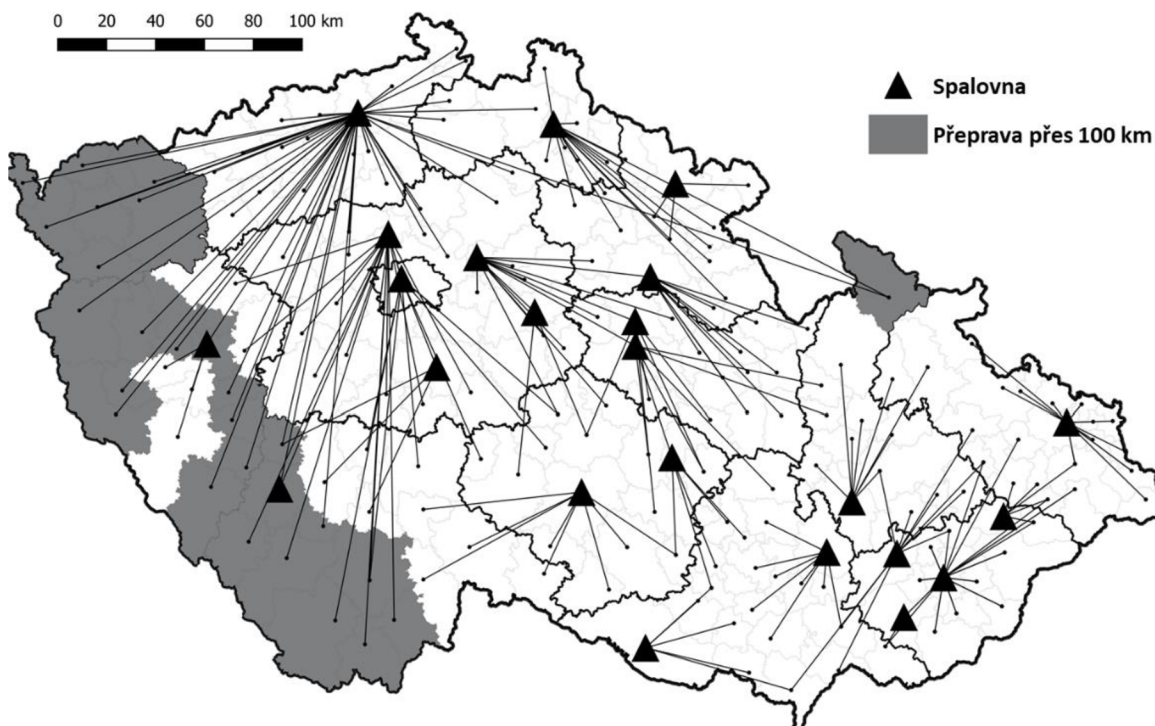
Pro potřeby případové studie jsou definovány 3 scénáře, které jsou však řešeny zvlášť. Cílem je poskytnout vzhled do systému nakládání s NO a vyhodnotit současné kapacity, případně jejich navýšení. Výstavba nových zařízení je dnes zatížena zdoluhavou legislativou [41] a proto je mnohem pravděpodobnější možnost rozšíření stávajících zařízení. Jsou tedy definovány další kapacitní scénáře pro jednotlivá zařízení, konkrétně se jedná o:

- SC1 – současná kapacita zpracování.
- SC2 – zvýšení kapacity zpracování o 50 %.
- SC3 – neomezené kapacity ve stávajících lokalitách.

V rámci prezentace výsledků budou zobrazeny toky odpadu pro SC1, který reprezentuje současnou infrastrukturu a může tedy poskytnout adekvátní vzhled do systému. Současně budou zvýrazněny toky odpadu z regionů, které přesahují dopravní vzdálenost více než 100 km. U typu zařízení, kde je identifikována nedostatečnost kapacit, budou uvedeny i grafy k porovnání mezi scénáři. Z pohledu porovnání je klíčový zejména SC3, který lze považovat za optimální z pohledu plánování, pokud by bylo realizováno navýšení

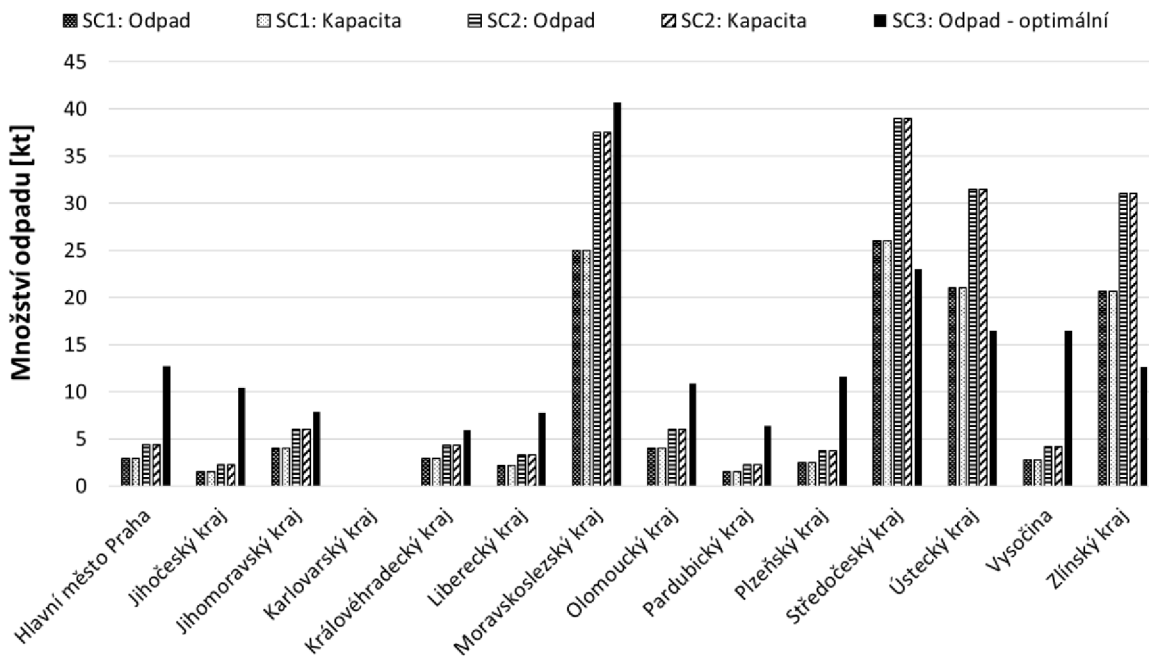
příslušných kapacit dle množství zpracovaného odpadu. Výpočet jednoho scénáře trvá přibližně 1 minutu včetně načítání vstupních dat.

Na následujícím Obr. 4.21 je zobrazena mapa pro toky odpadů spojených se spalováním. Jedná se o preferovaný typ zpracování i s ohledem na reziduální toky odpadu, které je možné z většiny využít pro rekultivaci skládek. Posouzení kapacit tohoto typu zpracování je tak klíčové, jelikož jejich nedostatečnost může ovlivňovat i další typy zpracování.



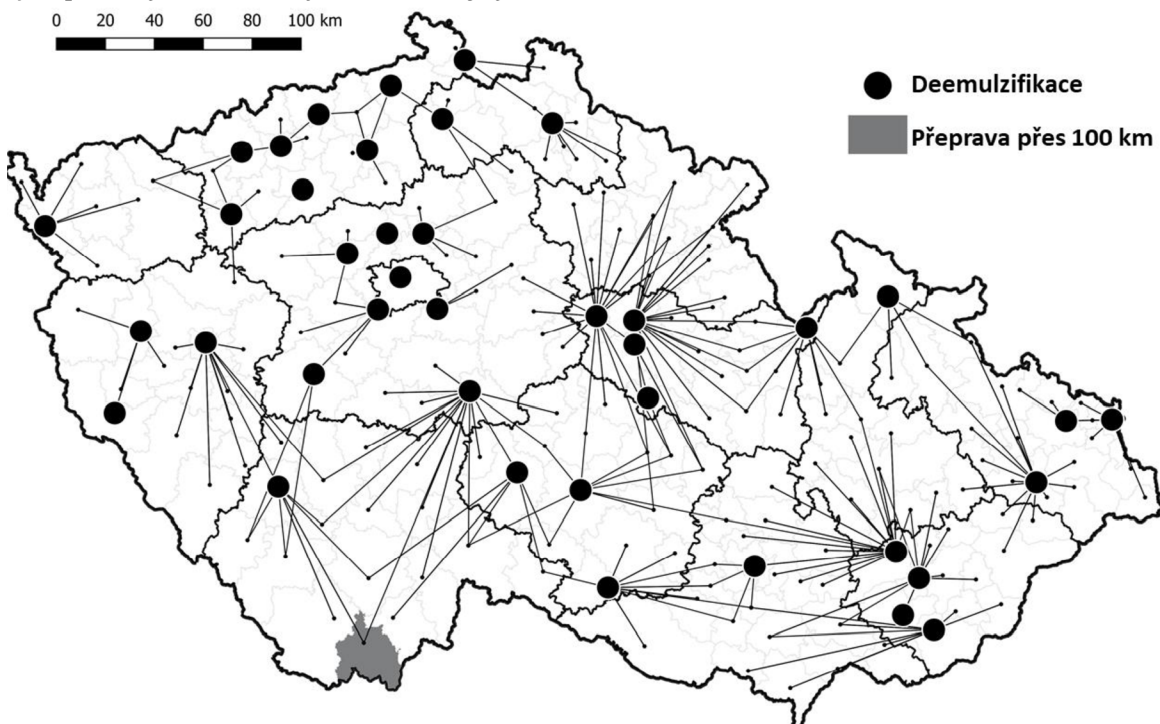
Obr. 4.21: Mapa toků NO alokovaného ke spalování.

V rámci scénáře SC1 jsou výpočtem identifikovány regiony zejména na západě ČR, které musí odpad transportovat ke zpracování na vzdálenost větší než 100 km. Na Obr. 4.22 je k dispozici srovnání jednotlivých krajů a scénářů navyšování kapacit. Z vyhodnocení vyplývá, že kapacita je v současnosti nedostatečná a je vhodné zvážit její navýšení. Ovšem výsledky do jisté míry zkresluje skutečnost, že se jedná o nejpreferovanější typ zpracování. Pokud by byl uvažován pouze proud odpadu určený jen ke spálení, aktuální kapacity by byly dostatečné. Celkové množství možného spalitelného odpadu odpovídá přibližně 180 kt při dostupné kapacitě pouze 117 kt. Nicméně, současné kapacity lze posoudit jako nedostatečné a ani zvýšení o 50 % nezajistí soběstačnost v rámci definované vzdálenosti 100 km. Optimální navýšení provozních kapacit by mělo dosahovat 100 %. Na druhou stranu výsledky optimalizace scénáře SC3 jasně ukazuje, že rovnoměrné zvýšení kapacit ve všech spalovnách najednou lze považovat za neefektivní. Téměř všechny kraje mají svá zařízení pro spalování NO, avšak pouze tři mají odpovídající kapacitu pro zajištění soběstačnosti. Proto lze doporučit navýšení kapacit jen v regionech, kde je to potřebné. Pokud by legislativa umožnila vybudování nových zařízení, lze doporučit výstavbu zejména v Karlovarském a Jihočeském kraji.



Obr. 4.22: Srovnání vyhodnocení dostatečnosti kapacit spalování NO v různých scénářích.

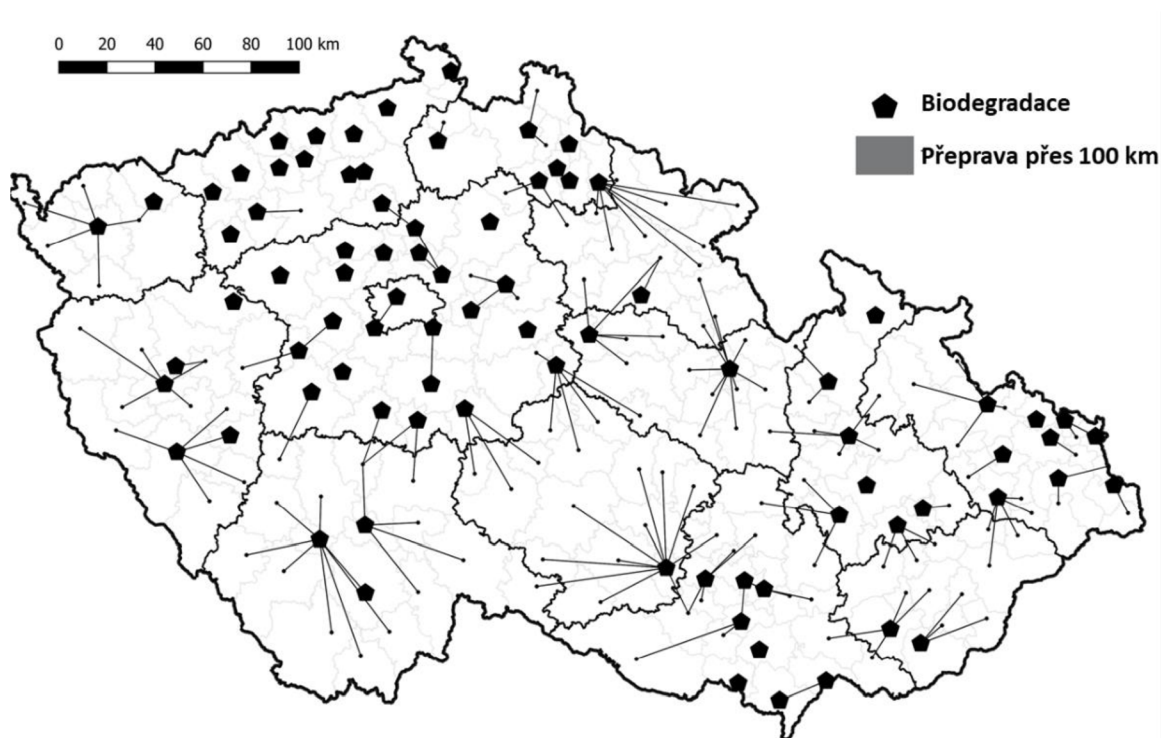
Na následujícím Obr. 4.23 jsou zobrazeny toky odpadu určené k deemulzifikaci či neutralizaci. Tyto způsoby zpracování jsou pro potřeby vizualizace sjednoceny, jelikož jsou tyto procesy realizovány v rámci stejných zařízení.



Obr. 4.23: Mapa toků NO alokovaného k deemulzifikaci.

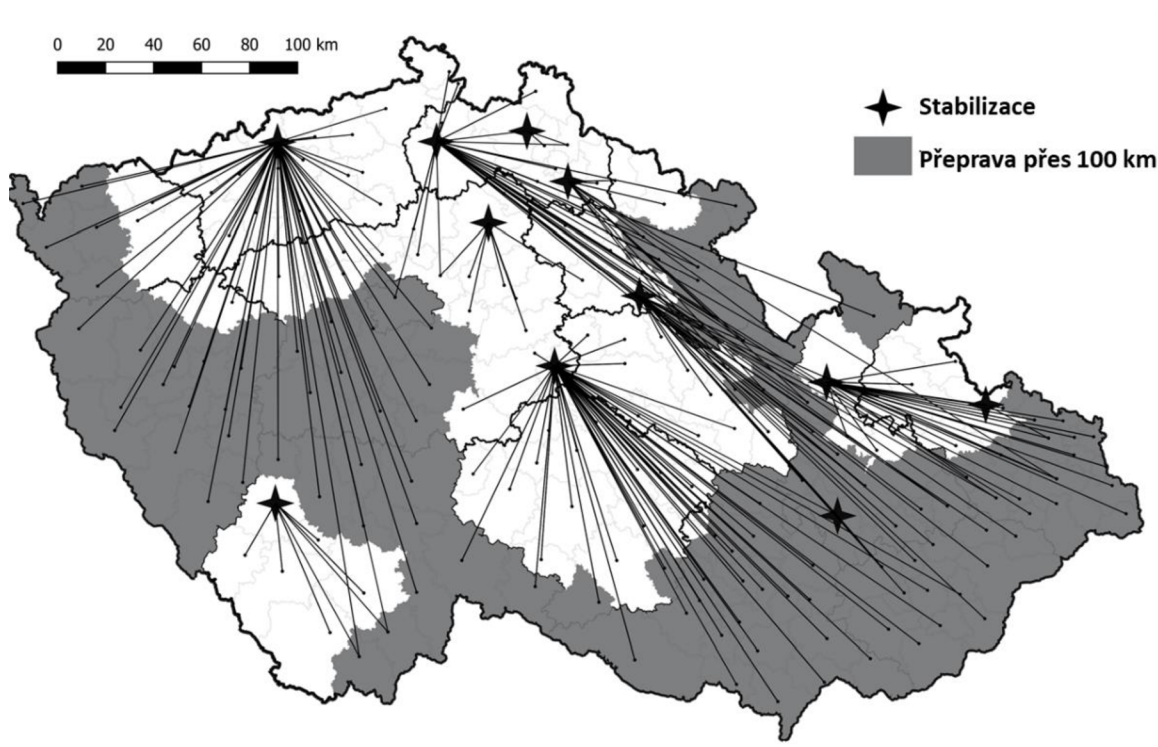


Zařízení pro tento typ zpracování jsou po ČR adekvátně rozmístěna s dostatečnou kapacitou a nedochází tak přepravě odpadu na větší vzdálenosti. Jedinou výjimku představuje jedno ORP v Jihočeském kraji. Infrastruktura pro deemulzifikaci a neutralizaci NO tak nepotřebuje významné změny a kapacity lze považovat za dostatečné pro nadcházející roky. Výsledky za jednotlivé scénáře lze dohledat v původním článku [A11]. Na následujícím obrázku Obr. 4.24 jsou znázorněny toky odpadů týkající se biodegradace včetně vizualizace dostupných zařízení, kam může tento proud směřovat.



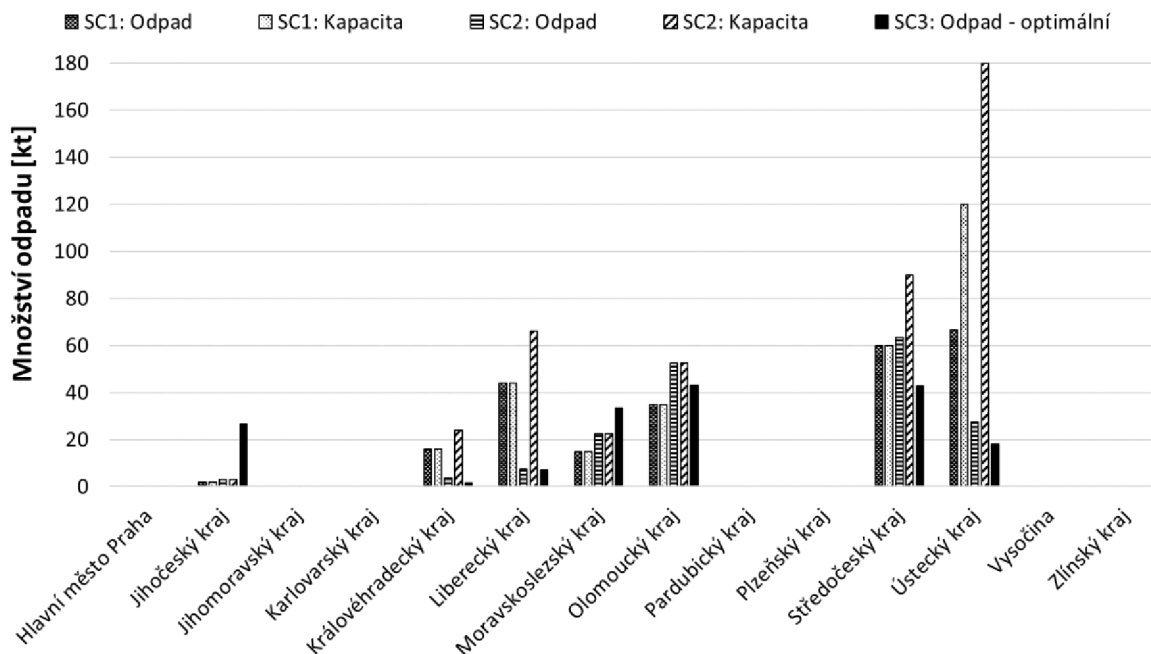
Obr. 4.24: Mapa toků NO alokovaného k biodegradaci.

Infrastruktura pro biodegradaci je kapacitně dostačující až předimenzovaná pro podmínky v ČR. Celkový počet 84 zařízení je dostačující k pokrytí celého území bez problémů se soběstačností a dlouhými přepravními vzdálenostmi. Nedostatečnost byla identifikována pouze v případě hlavního města Prahy. Zařízení pro biodegradaci obvykle zabírají rozsáhlé plochy, což nelze realizovat ve velmi urbanizovaném regionu. Potřebná zpracovatelská kapacita je však k dispozici v sousedícím Středočeském kraji. Celkově lze biodegradaci považovat za soběstačnou a nejsou potřebné žádné zásahy nebo změny v infrastruktuře zpracování. Porovnání kapacit v jednotlivých krajích a scénářích lze dohledat v původním článku [A11]. Na Obr. 4.25 je znázorněn tok nebezpečného odpadu určený pro stabilizaci.



Obr. 4.25: Mapa toků NO alokovaného ke stabilizaci.

Z mapového podkladu je patrné, že infrastruktura pro stabilizaci NO je značně poddimenzovaná a doprava odpadu z velké části ORP přesahuje 100 km. V současnosti existuje pouze 11 zařízení, která jsou navíc nerovnoměrně umístěna v rámci ČR. Proto dochází k časté alokaci odpadu do zařízení téměř přes celé území ČR. Porovnání kapacit v jednotlivých scénářích a krajích je zobrazeno na Obr. 4.26.



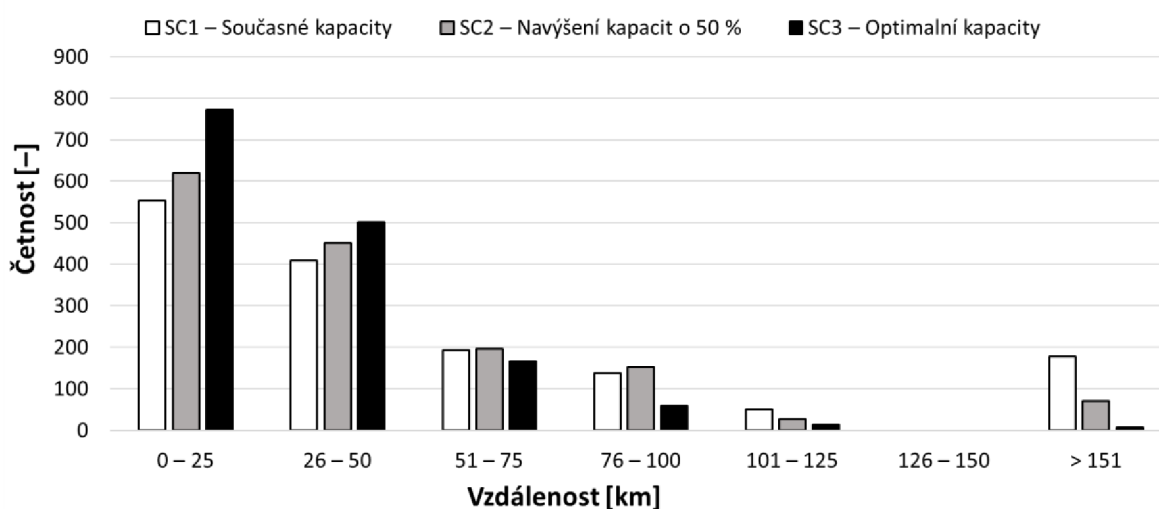
Obr. 4.26: Srovnání vyhodnocení dostatečnosti kapacit stabilizace NO v různých scénářích.

Kapacity stabilizace by měly být výrazně zvýšeny zejména v části východní ČR, kde se nachází pouze 3 zařízení s kapacitou kolem 50 kt/rok. Zvýšení kapacit v tomto případě však

Lze posoudit jako neefektivní z pohledu dopravních nákladů a je nutné zde vybudovat nová zařízení. Na druhé straně v rámci porovnání jednotlivých scénářů je patrné, že stabilizační jednotky jsou významně ovlivněny nedostatečnou kapacitou pro spalování NO a ve výsledku tok "spalování nebo stabilizace" musí být téměř celý stabilizován. Ve výsledku tak lze pouze doporučit (v případě pouhého navyšování kapacit v současných zařízeních) v Jihočeském a Moravskoslezském kraji.

Hlavní závěry týkající se vyhodnocení kapacit pro zpracování NO lze shrnout do následujících bodů:

- Současná kapacita deemulzifikace, neutralizace a biodegradace je dostačující.
- Spalování NO představuje nejpreferovanější možnost a kapacita by měla být zvýšena. Pro tento typ zpracování je nedostatečná kapacita a 50% nárůst provozu již existujících zařízení stále nestačí. Doporučení je celkovou kapacitu spalování zvýšit až o 100 %, ale v souladu s potřebami každého regionu.
- V případě stabilizace je identifikován obrovský nedostatek kapacity a dlouhé přepravní vzdálenosti. Polovina všech ORP je nuceno přepravovat odpad na vzdálenost větší než 100 km. To je způsobeno především nedostatečnou kapacitou spalování NO, což znamená, že zbývající odpad musí být stabilizován. Po navýšení kapacit pro spalování tak není nutné příliš navyšovat kapacity pro stabilizaci. Na druhou stranu jsou však kapacity příliš koncentrovány jen na některých místech.
- V rámci celkového vyhodnocení zpracovatelské infrastruktury pro NO lze konstatovat, že zařízení by měla být rozšířena či lokalizována nová, zejména v moravských a slezských regionech, kde existuje jen několik zařízení pro zpracování s menšími kapacitami za rok.
- Přepravní vzdálenost NO v současné době činí u 15 % odpadu více než 100 km, což neodpovídá regionální soběstačnosti. Histogram přepravní vzdálenosti ve všech scénářích je zobrazen na Obr. 4.27. Je zřejmé, že optimální zvýšení jednotlivých kapacit téměř odstraňuje přepravu přes 100 km. Bez nových zařízení však nelze dosáhnout soběstačnosti v definované vzdálenosti.



Obr. 4.27: Obecný rámec navrhovaného

## 4.6 Shrnutí a diskuze

Uvedené matematické modely s ohledem na řešené případové studie mohou poskytnout příslušným institucím potřebný aparát pro optimalizaci systému nakládání s odpady. Na základě ekonomického vyhodnocení a dopadů na životní prostředí lze efektivně alokovat prostředky a podpořit tak dlouhodobou udržitelnost systému a plnění nastavených legislativních cílů. Je však nutné podotknout, že výsledky modelů reflektují vstupní data, které mohou obsahovat nepřesnosti či špatné odhady budoucího vývoje. Zároveň kvůli komplexnosti OH jsou některé části zjednodušeny či vhodně aproximovány, případně není úloha řešena v řádném detailu a mohou tak být opomenuty regionální vazby. Výstupy by tak měli být předmětem expertního posouzení a navržené řešení by mělo sloužit pouze jako podpůrný materiál. To platí i v případě vícekritériální optimalizace, kde vybraný kompromis mezi ekonomickým a environmentálním kritériem byl v této dizertační práci realizován spíše pro verifikaci modelu a ukázkou jeho přínosů.

Konkrétní případové studie by bylo vhodné dopracovat i s ohledem na další přístupy týkající se výpočetní náročnosti uvedené v další kapitole 5. To umožní v některých případech získat více detailní výsledky, zahrnout další zařízení do výpočtu, případně modelovat více odpadových proudů najednou. Například u dotřídění plastů je vhodné uvažovat i zařízení ZEVO, která jsou schválena a začínají být realizována, zatímco v modelech byly uvažovány pouze ve formě potenciální výstavby. Podobně i u ostatních modelů jsou potenciální místa zařízení minimalizována v pre-processingu, aby byla úloha vypočitatelná v reálném čase. Nicméně zahrnutí dalších lokalit může přinést výhodnější řešení, zejména co se týká alokace odpadu a nákladů na transport. Následující kapitola 5 je tedy věnována přístupům pro redukci grafové struktury, která definuje velikost a náročnost optimalizačního výpočtu. Nicméně i současný detail řešených úloh poskytuje informace o daném systému, dostupnosti odpadu či kapacit. Na základě těchto informací již lze plánovat rozšíření zpracovatelské infrastruktury a přistoupit například k vyhodnocení individuálních projektů.

Hlavním cílem navazujícího vývoje je implementace matematických modelů do uceleného nástroje v podobě software či webové aplikace, která umožní využívat tento aparát efektivněji včetně širšího spektra uživatelů. U obecného modelu naopak nelze předpokládat odpovídající využití při řešení specifických úloh, ke kterým je nutné přistupovat individuálně. Nicméně obecný model může pomoci získat alespoň počáteční odhad pro rozhodnutí, zda-li má vyhodnocovaný projekt smysl řešit či nikoliv. Klíčové je také implementovat další rozšíření, například v podobě multimodální dopravy, kdy kombinace více typů dopravních prostředků může přinést další snížení nákladů. Oproti silniční dopravě zde však vystupuje řada dalších parametrů a podmínek často s nelineárním charakterem či potřebou implementace celočíselných proměnných.

## 5 VÝPOČTOVÁ NÁROČNOST

Pokročilé komplexní nástroje založené na optimalizačních problémech mohou poskytnout vhled do problematiky a zohlednit mnohé vazby v systému vyplývajících právě z monitoringu a objemu dostupných dat. Často však reálné zavilosti představují nelineární funkce, případně je nutné k popisu skutečnosti implementovat celočíselné proměnné. Navíc s nárůstem množství dat je také nutné řešit úlohy ve větším detailu. Rozsáhlé úlohy ale není možné efektivně řešit, jelikož známé algoritmy jsou založené buď na prohledávání stromu možných kombinací proměnných anebo nezaručují globální optimum. Ve výsledku tak není možné využít veškerá dostupná data v patřičném detailu nebo jsou zaváděna určitá zjednodušení, která naopak nezohledňují určité charakteristiky modelovaného systému.

Lokační a alokační úlohy postavené na toku v síti lze zařadit mezi kombinatorické optimalizační úlohy. Hlavní problematikou zde je skutečnost, že náročnost řešení optimalizace společně s rozšiřováním velikosti úlohy polynomiálně (až exponenciálně) roste. To je spojeno s povahou těchto problémů, kdy většina je založena na podkladových grafech. Jednotlivé uzly mohou představovat libovolné prvky v systému jako jsou kontejnery pro sběr odpadu, zařízení na výrobu energie, skládky, obce nebo dokonce celé státy. Uzly jsou propojeny hranami s váhami, které mohou popisovat požadovaný čas nebo náklady cestování mezi uzly. Přidání dalšího subsystému modelovaného řetězce tak často vyústí k nepoměrnému nárůstu proměnných a omezení, jelikož dílčí vrstvy systému musí být vzájemně propojeny. Tím je významně ovlivněna složitost problému a hledání optimálního řešení nemusí být následně proveditelné ani na moderních výpočetních počítačích.

Přínos těchto nástrojů pro plánování zpracovatelské infrastruktury a dopravy je však klíčový, a proto je vyvíjena řada různých technik od filtrování potřebných proměnných, dekompozičních metod či heuristik. Jednotlivé výhody a nevýhody těchto přístupů jsou popsány a diskutovány v kapitole 2.3. Vzhledem k řešení síťových úloh bude však pozornost věnována především vhodnému pre-processingu grafové struktury při zachování exaktního řešení s garancí globálního optima. Úpravu dopravní sítě je možné realizovat pomocí odstranění uzlů a hran, které nejsou pro výsledek výpočtu důležité, či lze předpokládat jejich nezahrnutí do optimálního řešení. Příklad odstranění uzlů však ve většině případů vyústí v agregaci do jednoho uzlu včetně vstupních parametrů, jelikož jeho úplné odstranění vede k vynechání některých prvků řetězce či přímé ovlivnění podmínek úlohy (produkce vs. kapacita). Naopak v případě hran je situace jednodušší a na základě vybraných parametrů je možné dle předpokladů nevýhodné hrany přímo odstranit. Cílem je vyvinout vhodné přístupy pro snížení výpočetní náročnosti přestavených úloh v kapitole 4.

### 5.1 Shlukování – Variabilní detail

Prvním zkoumaným řešením pro snížení výpočetního času je redukce počtu uzlů. Strukturu dopravní sítě lze navázat na administrativní členění řešeného regionu podle očekávané výpočetní náročnosti. V případě ČR se jedná o 14 krajů, 206 ORP a 6 258 obcí, které mohou být dále členěny na ZÚJ, kterých celkově v ČR je evidováno na 6 392. Je patrné, že při potřebě výsledků ve větším detailu územního členění značně narůstá počet modelovaných uzlů. Komplexní modely většinou jsou řešeny pouze na desítkách či nízkých stovkách uzlů a výsledky pak neposkytují potřebný vhled do problematiky. Případové studie však nemusí být řešeny jen z pohledu celostátního plánování, ale může se jednat pouze o vyhodnocení vybraného kraje či konkrétního zařízení. V takovém případě je možné modelovat v řádném

detailu jen vybranou oblast. Nicméně úplné zanedbání širšího okolí může významně ovlivnit výsledky optimalizace. Vzdálenější oblasti mohou však být modelovány s menším detailem, jelikož pro vyhodnocovaný region nejsou informace týkající se přesných toků klíčové. Pro modelování určitých problémů tak může být výhodné definovat proměnlivý detail sítě s ohledem na sledovaná kritéria.

Cílem přístupu je vyvinout obecnou metodiku pro redukci počtu uzlů v síti za pomoci jejich agregace, přičemž v blízkosti zájmových bodů budou uzly představovat jednotlivé obce, zatímco s větší vzdáleností se budou seskupovat postupně do větších celků. Ve zjednodušené formě lze definovat oblasti, které budou modelovány jako ZÚJ a následně jako obec, ORP či kraj. Pro takový proměnlivý detail však může být složité určit přesné hranice a zároveň zachovat jejich význam při agregaci dat. Výhodnější přístup spočívá v aplikaci shlukové analýzy na požadovanou úroveň územního členění v zájmovém bodě. Následně s využitím vhodných parametrů a transformací lze docílit požadované struktury dopravní sítě.

### 5.1.1 Transformace souřadnic

Základní myšlenkou je vytvořit proměnnou úroveň detailu v dopravní síti s ohledem na oblasti zájmu, které je potřeba podrobněji analyzovat z hlediska strategického plánování. Klíčovou částí přístupu je transformace souřadnic uzlů představující jednotlivé obce nebo regiony ve zkoumaném území. Pouhá aplikace shlukové analýzy na původní souřadnicový systém by vyústila v rovnoměrné rozdělení shluků po celém území. Vhodně zvolená transformace však umožňuje rozšíření původní oblasti, reorganizaci a oddělení jednotlivých uzlů na základě vybraného zájmového bodu. Zde lze využít skutečnosti, že při inicializaci shlukovacích algoritmů je obvykle celý prostor rovnoměrně pokrytý počátečními centroidy. Při vhodném uspořádání tedy případně na hustě rozmístěné obce jeden reprezentant stejně jako na řídko rozmístěné obce. Cílem je tedy v rámci transformace separovat body okolo zájmové oblasti, zatímco vzdálené body více seskupovat. Je však nutné zanechat původní strukturu, aby výsledné shluky byly konzistentní (spojité).

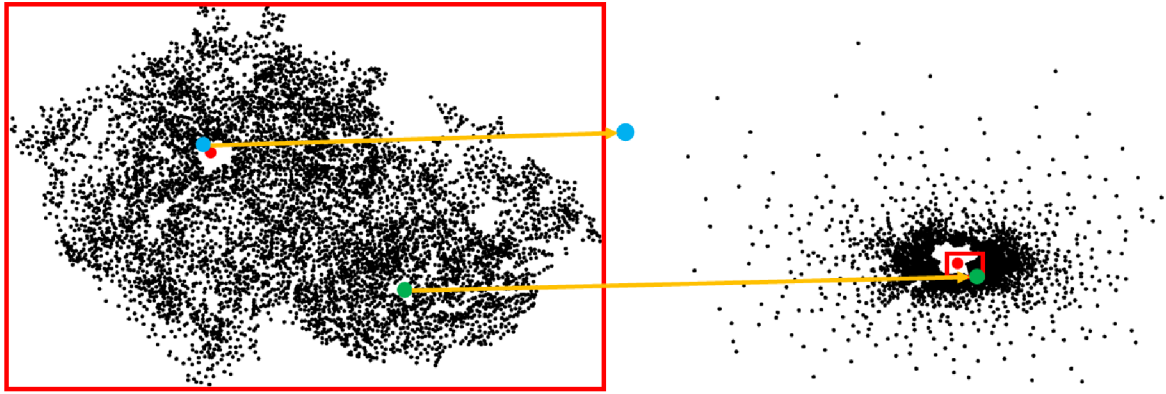
Definice jednotlivých kroků pro vytvoření variabilního detailu je prezentována pro řešení síťových problémů, kde se předpokládá dvourozměrný prostor, tj. každý bod v síti (množina I) lze vyjádřit pomocí dvou souřadnic (viz rovnice (5.1)).

$$A_i = [X_i, Y_i], \quad \forall i \in I. \quad (5.1)$$

Zmíněná transformace pro každý uzel v 2D prostoru je dána rovnicí (5.2), kde index R označuje bod zájmu (referenční bod).

$$\hat{A}_i = [\hat{X}_i, \hat{Y}_i] = [X_R, Y_R] + \frac{[X_i, Y_i] - [X_R, Y_R]}{\sqrt{(X_i - X_R)^2 + (Y_i - Y_R)^2}}, \quad \forall i \in I - \{R\}. \quad (5.2)$$

Tato transformace definuje nové souřadnice pro každý uzel, které jsou posunuty podél přímky v daném směru od referenčního bodu. Tím je zajištěno, že koherence uzlů není narušena a okolí všech bodů je pouze rozšířeno. Pro zachování požadovaného efektu během transformace nesmí být referenční bod v počátku souřadnicového systému a nejdelší vzdálenost mezi dvěma uzly musí být menší nebo rovna 1. V opačném případě by mohlo dojít k porušení principů transformace, kdy by body blíže k zájmovému uzlu nebyly transformovány dále. Proto je nutné provést vhodnou normalizaci souřadnic uzlů. Navíc je nutné odstranit referenční bod, který není předmětem transformace a následně bude vystupovat jako samostatný uzel. Ukázka transformace pro případ ČR se zájmovým bodem v Praze je znázorněna na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Ukázka principu transformace bodů.

Umístění červeného referenčního bodu zůstává nezměněno, zatímco ostatní body jsou posunuty v původním směru od referenčního bodu. Lze pozorovat výrazné přeškálování souřadnic, kdy většina bodů je transformována mimo původní území ČR. Nejbližší k referenčnímu je modrý bod, který je posunut nejdále, zatímco pozice vzdáleného zeleného bodu se téměř nezměnila a zůstává na hranici území ČR. Na transformované souřadnice uzlů lze následně aplikovat shlukovou analýzu.

Mezi nejčastěji využívané algoritmy shlukové analýzy patří k-means [B109]. Jedná se o metodu, která má za cíl rozdělit sadu  $N$  bodů  $m$ -rozměrném prostoru do  $K$  shluků s centroidy  $c_k$ , přičemž každý bod je přiřazen k nejbližšímu centroidu. Předpokládá se, že mezi body a středy shluků je definována vzdálenostní (nebo podobnostní) funkce, přičemž nejčastěji je využívána euklidovská vzdálenost. Jako kritérium optimálního rozdělení je následně využívána čtvercová chyba definována jako souhrnná vzdálenost mezi body a jejich centroidy. Minimalizace chyby však představuje problém NP-Hard optimalizace a pro řešení jsou tak vyvinuty účinné heuristické algoritmy, které rychle konvergují k lokálnímu optimu. Výsledné shluky jsou sice pravidelné a mají přibližně stejnou velikost, avšak z důvodu využití heuristik se v případě opakovaných analýz může uspořádání shluků lišit.

Prezentovaný přístup je obecný a lze ho aplikovat také například na trojrozměrný prostor a zahrnout výškový profil mezi jednotlivými subjekty v systému. Klíčovým vstupem pro shlukovací algoritmus je počet konečných shluků. Maximální počet uzlů, který lze následně v rozumném čase vypočítat, by měl být určen z citlivostní analýzy optimalizačního nástroje, který bude použit pro vyhodnocení. Následující kapitoly rozšiřují tento přístup o další funkce, které mohou poskytnout více možností pro přípravu dopravní sítě, aby vyhověla požadavkům konkrétního problému.

### 5.1.2 Volba variabilního detailu

Při řešení tokových a alokačních úloh může být žádoucí volba požadovaného detailu v okolí referenčního bodu a modelovat variabilitu detailu sítě na míru řešené úloze. Cílem je vytvořit dopravní síť s flexibilním uspořádáním, které umožňuje měnit rozložení shluků v rámci modelovaného území. K dosažení tohoto cíle transformace zahrnuje koeficient  $P$  dle rovnice (5.3), kde vyšší hodnota zvyšuje úroveň detailu v okolí referenčního bodu, což vede k většímu množství menších shluků kolem bodu, zatímco velikost jednotlivých shluků se zvyšuje významněji s větší vzdáleností.

$$[\hat{X}_i, \hat{Y}_i] = [X_R, Y_R] + \frac{[X_i, Y_i] - [X_R, Y_R]}{(\sqrt{(X_i - X_R)^2 + (Y_i - Y_R)^2})^P}, \quad \forall i \in I - \{R\} \quad (5.3)$$

Přípustný rozsah koeficientu je v intervalu  $[0, \text{nekonečno})$ . Hodnota koeficientu by měla být přizpůsobena poměru mezi počtem původních uzlů a počtem shluků. V opačném případě se pro vyšší hodnoty koeficientu mohou vytvořit sférické shluky kolem středu zájmového bodu. Hodnoty nižší než jedna vedou k menšímu detailu v okolí zájmového bodu, až k původnímu problému shlukování bez transformace, kdy je hodnota koeficientu rovna nule.

### 5.1.3 Více zájmových bodů

Dosud uvedený přístup umožňoval modelování dopravní infrastruktury s ohledem pouze na jediný bod zájmu. To může být výhodné při hodnocení konkrétního projektu bez podobných zařízení v okolí, které by mohly ovlivnit jeho dlouhodobou udržitelnost. Avšak při strategickém plánování infrastruktury je často nutné posoudit více míst současně a zahrnout konkurenční projekty. Je také žádoucí modelovat vybrané oblasti v různých úrovních detailu. Další rozšíření se tak zaměřuje na modelování s ohledem na více bodů zájmu s různými koeficienty detailu  $P$ .

Princip rozšíření je založen na vícedimenzionálním prostoru. Původní dvoudimenzionální problém je rozšířen o další souřadnice, kde se dimenze prostoru zvětšuje o dvě souřadnice s každým dalším bodem zájmu. Necht'  $M$  je množina bodů zájmu, potom každý bod v prostoru lze vyjádřit pomocí rovnice (5.4).

$$A_i = [\hat{X}_{i_1}, \hat{Y}_{i_1}, \dots, \hat{X}_{i_m}, \hat{Y}_{i_m}, \dots, \hat{X}_{i_{|M|}}, \hat{Y}_{i_{|M|}}]. \quad (5.4)$$

Příslušný pár souřadnic je poté transformován pomocí následujícího vztahu, rovnice (5.5).

$$[\hat{X}_{i_m}, \hat{Y}_{i_m}] = [X_{R_m}, Y_{R_m}] + \frac{[X_i, Y_i] - [X_{R_m}, Y_{R_m}]}{(\sqrt{(X_i - X_{R_m})^2 + (Y_i - Y_{R_m})^2})^{P_m}}, \quad (5.5)$$

$$\forall m \in M, \forall i \in I - \{M\}.$$

Princip transformace zůstává totožný, jen každá dvojice souřadnic příslušící konkrétnímu referenčnímu bodu je řešená zvlášť. Tím je získáno nutné rozdělení, kde obce v blízkosti jednoho zájmového bodu nebudou transformovány do míst, kde se můžou vyskytovat jiné obce v blízkosti jiného zájmového bodu. Následná shluková analýza tak probíhá v rámci prostoru s větší dimenzí původní úlohy, která odpovídá jeho násobku vzhledem k počtu zájmových bodů.

### 5.1.4 Reálná dopravní síť

Metoda k-means představuje často používaný algoritmus shlukování, který může využívat různých metrik pro výpočet vzdáleností. Nevýhoda tohoto algoritmu plyne z definice samotného názvu, který vyžaduje výpočet průměru ze zadaných souřadnic příslušných uzlů. To může vést k umístění centroidu mimo skutečnou infrastrukturní síť. Tato skutečnost zabraňuje využití vzdáleností založených na reálných vzdálenostech kopírující geografické podmínky. Mezi euklidovskou metrikou a vzdálenostmi definovanými existující dopravní sítí může být velmi rozdílná, zejména v případě přírodních překážek (hory, vodní plochy).



Pro použití skutečných vzdáleností je třeba použít jiný algoritmus shlukování. Konkrétně lze použít alternativu k-means nazvanou k-medoids, která umožňuje použití předem definované matice vzdáleností mezi všemi uzly v systému a následně vybere jako reprezentanta jednoho z existujících uzlů. Při následné integraci modelované infrastruktury do optimalizačního nástroje má pak každý reprezentant jasně definované vzdálenosti na základě reálné dopravní sítě. Podobně jako u k-means je nutné provést transformaci, avšak s tím rozdílem, že se již nevyužívají souřadnice bodů, ale transformace se musí aplikovat na zmíněnou matici vzdáleností. Zároveň je žádoucí do transformace zahrnout možnost vícero zájmových bodů včetně koeficientu určující detail v jejich okolí. Příslušná transformace včetně koeficientu detailu pro jednotlivé zájmové body je definována rovnicí (5.6).

$$\hat{D}_{i,j} = \sum_{m=1}^{|M|} \frac{D_{i,j}}{\min(D_{i,R_m}; D_{R_m,j})^{P_m}}, \quad \forall i, j \in I - \{M\}. \quad (5.6)$$

Myšlenka výpočtu transformace je zachována stejně jako u k-means, pouze v případě matice vzdáleností je vícedimenzionální prostor přeformulován na součet transformovaných vzdáleností vztahujících se ke každému bodu zájmu. Transformace vzdálenosti vzhledem k jednomu zájmovému bodu je definována jako skutečná vzdálenost mezi body dělená menší vzdáleností obou bodů od daného bodu zájmu. Pro zajištění správné funkcionality musí být matice vzdáleností normalizována do rozsahu 0-1.

### 5.1.5 Klíčové parametry

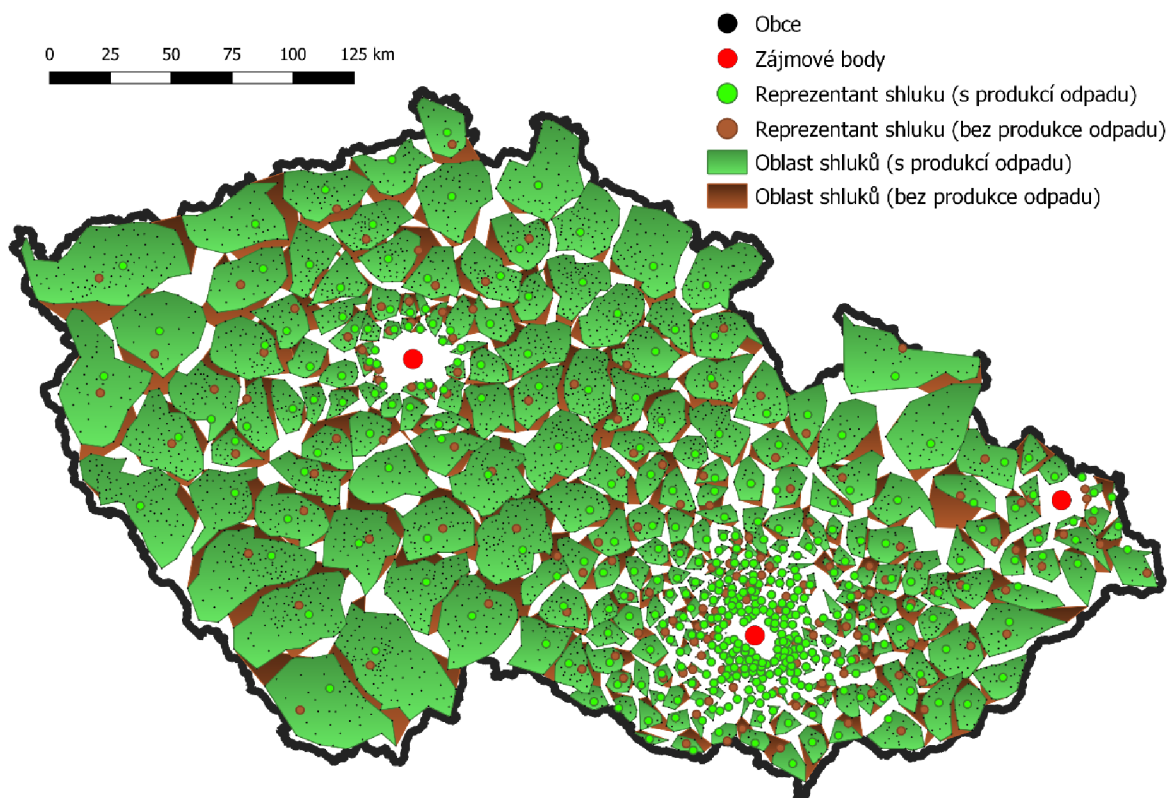
Při řešení konkrétní optimalizační úlohy lze většinou identifikovat klíčové parametry, které významně ovlivňují optimální řešení. Tyto parametry může být vhodné zohlednit již v návrhu grafové struktury. Díky tomu mohou být minimalizovány dopady agregace na výslednou účelovou funkci a zejména na strategická rozhodnutí týkající se výstavby nových zařízení. V případě úloh souvisejících s toky odpadů a zajištění jejich zpracování hraje v optimalizaci důležitou roli produkce odpadu a jeho transport. Cílem by tedy mělo být vybrat zástupce tam, kde je nejvyšší koncentrace odpadu, zároveň ale také zohlednit jejich pozici v rámci shluku.

Při zahrnutí množství produkce odpadu do transformace souřadnic však dochází k narušení konzistence vytvořených shluků, které začnou být tvořeny z obcí s podobnou produkcí. Aplikace parametru až po transformaci souřadnic může také porušit konzistenci shluků. Navíc kvůli asymetrické matici vzdáleností není možné využívat známé postupy založené na konvergenci iteračního výpočtu a je vyžadováno ke shlukování přistupovat jako k optimalizační úloze, která je však výpočetně velmi náročná. Proto je nutné implementovat dodatečné parametry až v následném post-processingu a pouze upravit již získané rozdělení shluků. Při vyhodnocování každého shluku zvláště je možné nalézt optimálního zástupce uzlu na základě minimalizace rovnice (5.7) bez problémů s výpočetním časem. Poté je provedeno přiřazení nového uzlu tak, aby byla zajištěna nejkratší vzdálenost.

$$\min_{j \in I_k} \left( \sum_{i \in I_k} W_i D_{i,j} \right), \quad \forall k \in K. \quad (5.7)$$

Následující Obr. 5.2 znázorňuje řešení představeného přístupu na 6 258 obcí v ČR, které jsou rozděleny do 400 shluků. Město Brno je modelováno s koeficientem detailu 4, zatímco Praha a Ostrava jsou modelovány s hodnotou rovnou 2. Shluky a jejich reprezentanti jsou následně upraveni pomocí údajů o produkci odpadu. Z obrázku je patrné, že detail v okolí

zájmových bodů reflektuje nastavené hodnoty a okolí Brna je skutečně modelováno s výrazně větším detailem než ostatní dvě města. To umožní precizně vyhodnotit alokaci odpadů z okolí Brna, zatímco konkurenční zařízení v Praze a Ostravě mohou být modelovány s menší přesností, protože jakýkoli vliv na svoz v Brně bude pravděpodobně minimální. V opačném případě musí být implementován návrh infrastruktury s odlišnými parametry.



Obr. 5.2: Výsledné rozdělení obcí do shluků před a po zohlednění produkce odpadu.

### 5.1.6 Variabilní detail mezi zájmovými subjekty

V případě více konkurenčních zařízení a tím více referenčních bodů lze úroveň modelovaného detailu ručně upravit pro každý bod zvlášť. Pro obecnost však může být výhodné definovat obecný vztah koeficientu  $P$  vzhledem k vybranému hlavnímu bodu. Konkrétně lze tuto hodnotu upravit na základě vzdálenosti a tím docílit postupné změny detailu pro jednotlivá zařízení. Tuto funkci lze popsat následující rovnicí (5.8).

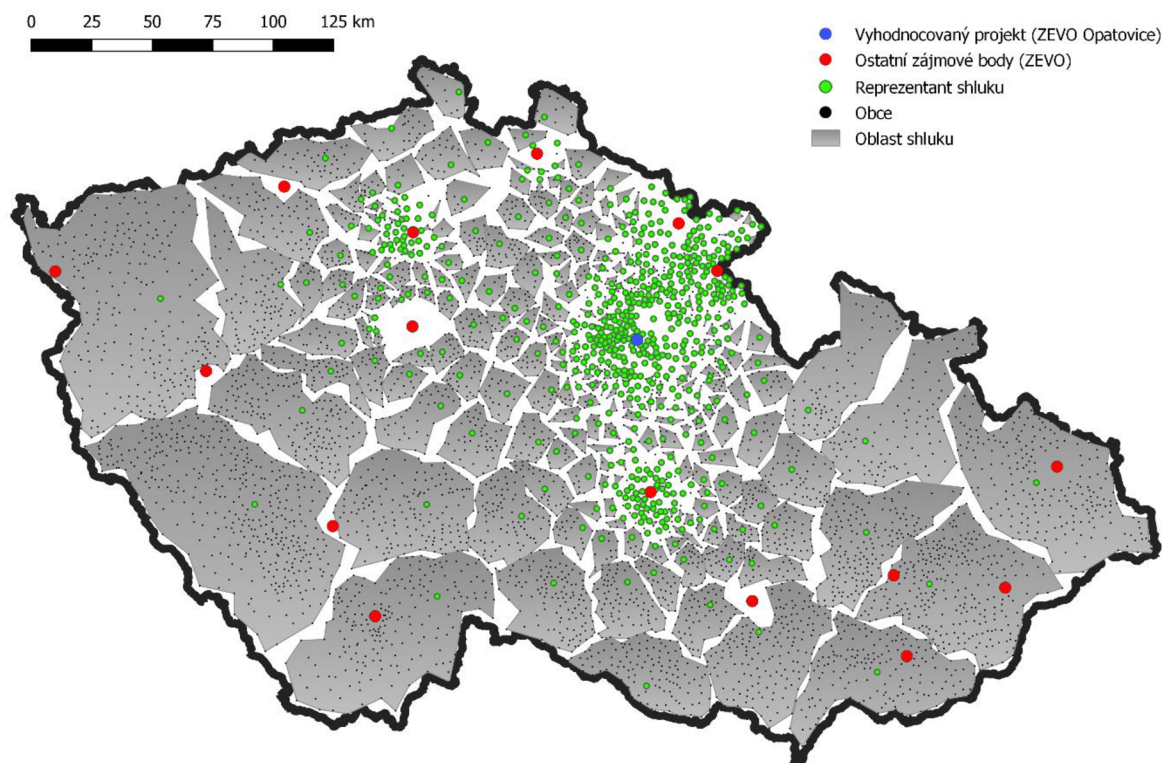
$$P_m = \max\left(P - P\left(\frac{D_{RR,R_m}}{D^{max}}\right)^C; 0\right), \quad \forall m \in M, \quad (5.8)$$

Pro využití této rovnice je nezbytné definovat maximální úroveň detailu  $P$  v hlavním zájmovém bodě a vzdálenost  $D^{max}$ , do které lze očekávat významný vliv konkurence. Koeficient  $C$  lze použít k nastavení míry (tendence), s jakou se bude koeficient měnit. Na základě vzdálenosti mezi hlavním a vybraným bodem zájmu se budou koeficienty měnit a po překročení stanovené maximální vzdálenosti bude okolí bodu modelováno bez transformace, což vede k významnému snížení vlivu při vytváření shluků. Vzhledem k definici celého postupu tvorby variabilní dopravní sítě je však nutné zařízení ve větší vzdálenosti než  $D^{max}$  vyjmout ze zájmových bodů, jinak budou ve výsledném grafu modelovány zvlášť a pravděpodobně budou představovat shluk uvnitř jiného shluku.

### 5.1.7 Aplikace na případovou studii

Ověření funkčnosti představeného přístupu k modelování proměnlivého detailu dopravní sítě je realizováno na modelu popsaném v kapitole 4.3, kde je řešena problematika energetického využití odpadu a zajištění provozních podmínek jednotlivých zařízení. Úloha byla řešena pouze v detailu ORP, zatímco cílem je realizovat výpočty na úrovni obcí. Z příslušné kapitoly je převzat matematický model s doplněním o předkládací stanice a vstupní hodnoty včetně potenciálních míst pro ZEVO jsou upraveny. Předmětem vyhodnocení v této studii je plánované ZEVO Opatovice, kde je klíčové zohlednit okolní konkurenční zařízení (existující i potenciální) a získat informace o možných tocích odpadu.

Řešení úlohy na úrovni obcí pro celou ČR představující 6 258 uzlů je výpočetně příliš složité kvůli zahrnutí celočíselných proměnných nutných pro překládací stanice a ZEVO. Překládací stanice jsou uvažovány v každém z 206 ORP, kde jsou také uvažovány skládky. Dále je uvažováno 17 ZEVO, z nichž jedno zařízení představuje právě vyhodnocované ve Velkých Opatovicích. Cílem je snížit původní problém pomocí představeného přístupu s ohledem na vybranou lokalitu. Redukce dopravní sítě je realizována na konečných 600 uzlů, přičemž obce s uvažovaným zařízením ZEVO představují samostatné uzly. Maximální úroveň detailu byla nastavena na hodnotu 5, zatímco pro konkurenční zařízení je využita kvadratická funkce (tj.  $C = 2$ ) v rovnici (5.8) až do vzdálenosti 200 km. Výsledná dopravní síť po transformaci souřadnic a shlukové analýze je na Obr. 5.3.

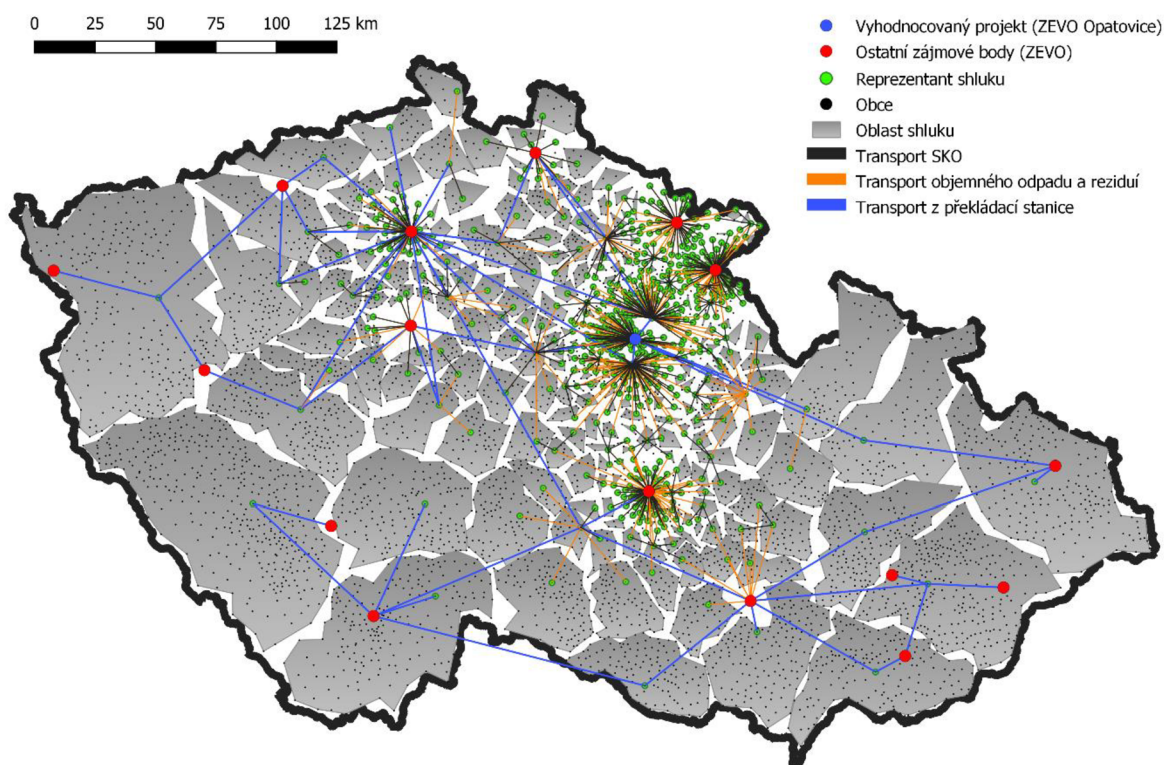


Obr. 5.3: Výsledná redukovaná dopravní síť pro uvažovanou případovou studii.

Z obrázku je patrné, že úroveň detailu je nejvyšší v okolí vyhodnocovaného zařízení. Podobný detail lze také pozorovat u nejbližších konkurenčních zařízení, zejména severně od zájmového bodu v Opatovicích. S rostoucí vzdáleností je detail sítě v okolí konkurenčních zařízení snižován, jak lze vidět například u zařízení jižně od Opatovic. ZEVO umístěná více

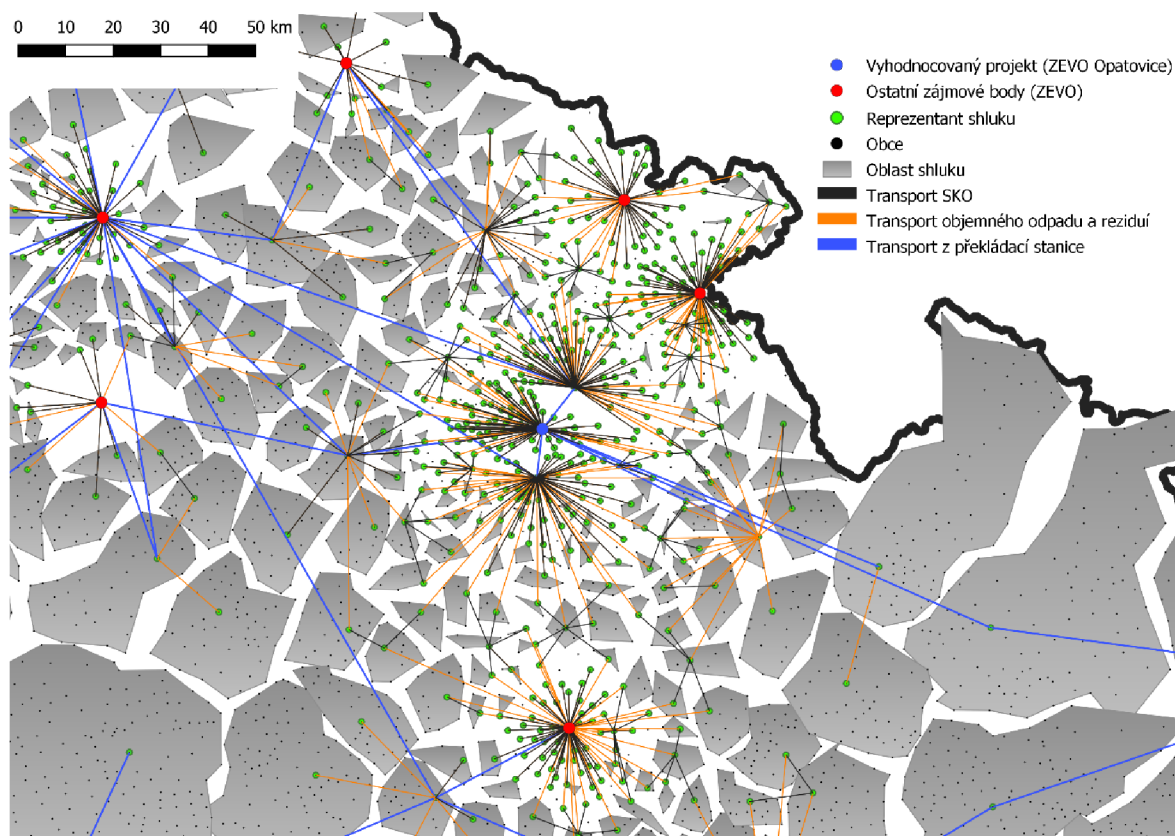
než 200 km daleko již nejsou zahrnuta do transformace souřadnic a v těchto oblastech jsou vytvářeny shluky z desítek obcí, které již představují celé okresy či kraje.

Výsledná redukovaná dopravní síť obsahuje 617 uzlů, v rámci kterých je uvažováno 103 překládacích stanic včetně skládek (v případě více zařízení v jednom shluku je modelováno pouze jedno), a 17 lokalit pro ZEVO. Kvůli bipartitnímu grafu mezi producenty a zpracovatelskými zařízeními zahrnuje model přibližně 150 tisíc hran, což při zohlednění tří typů odpadu a tří scénářů vede k 1,35 milionům proměnných, které jsou následně doplněny celočíselnými proměnnými. Optimalizační výpočet byl přerušen po 3 600 sekundách s hodnotou „relative gap“ 0,62 %, přičemž úroveň 1 % byla dosažena po 862 sekundách. Získané výsledky toků odpadu v rámci redukované sítě jsou znázorněny na následujícím Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Výsledné toky odpadu pro uvažovanou případovou studii na redukované síti.

Z výsledků vyplývá, že v blízkosti zkoumaného zařízení v Opatovicích je dostatek odpadu, a je možné tak plánovat kapacitu až 200 tisíc tun za rok. Plánovaná zařízení v nejbližším okolí jsou spíše menší (cca 50 tisíc tun za rok), zatímco větší konkurenční zařízení s potenciální velkou svozovou oblastí jsou příliš vzdálena a nemají vliv na modelovanou oblast. Klíčovou roli v těchto výsledcích hraje zohlednění i dalších frakcí odpadu mimo SKO, které výrazně zvyšují množství dostupného odpadu. Navíc odpad s vysokou výhřevností musí být energeticky využit, což vede k jeho přepravě na větší vzdálenosti, obvykle přes překládací stanice. Vzhledem k tomu, že existují také limity pro maximální výhřevnost spalované směsi a výkon kotle, je objemný odpad společně s výměty z dotřídňovacích linek rovnoměrně rozdělen mezi všechna zařízení. Následující Obr. 5.5 zobrazuje detailněji oblast v okolí vyhodnocovaného zařízení.



Obr. 5.5: Detailní toky odpadu pro uvažovanou případovou studii na redukované síti.

Srovnání s původní úlohou nebylo řešeno, jelikož s ohledem na definici úlohy a množství proměnných není možné úlohu řešit. Zde výpočetní náročnost ovlivňují hlavně celočíselné proměnné navázané jak na překládací stanice, tak i na ZEVO. Počet těchto proměnných výrazně zvyšuje počet kombinací, které je třeba vyhodnotit v rámci algoritmu „Branch and Bound“. Dalším důvodem jsou také vysoké požadavky na paměť počítače. Nicméně větší počet shluků, a tedy i vyšší úroveň detailu modelované infrastruktury, by pravděpodobně nevedla k odlišným závěrům a jiným svozovým oblastem, neboť již byla dosažena téměř maximální přesnost v okolí zájmového bodu. Jako možné zlepšení výstupů případové studie lze zvážit zpřesnění shluků, ze kterých se výhřevný odpad přepravuje na delší vzdálenosti pomocí překládacích stanic. Zde může jeden uzel zastupovat více překládacích stanic a z výsledku není zřejmé, která část odpadu je kam přepravována. Toto lze řešit zahrnutím překládacích stanic do zájmových bodů v určité vzdálenosti nebo vhodným způsobem modelovat podrobnější infrastrukturu v potenciálních oblastech, kde může docházet ke konkurenčnímu boji o odpad mezi jednotlivými zařízeními.

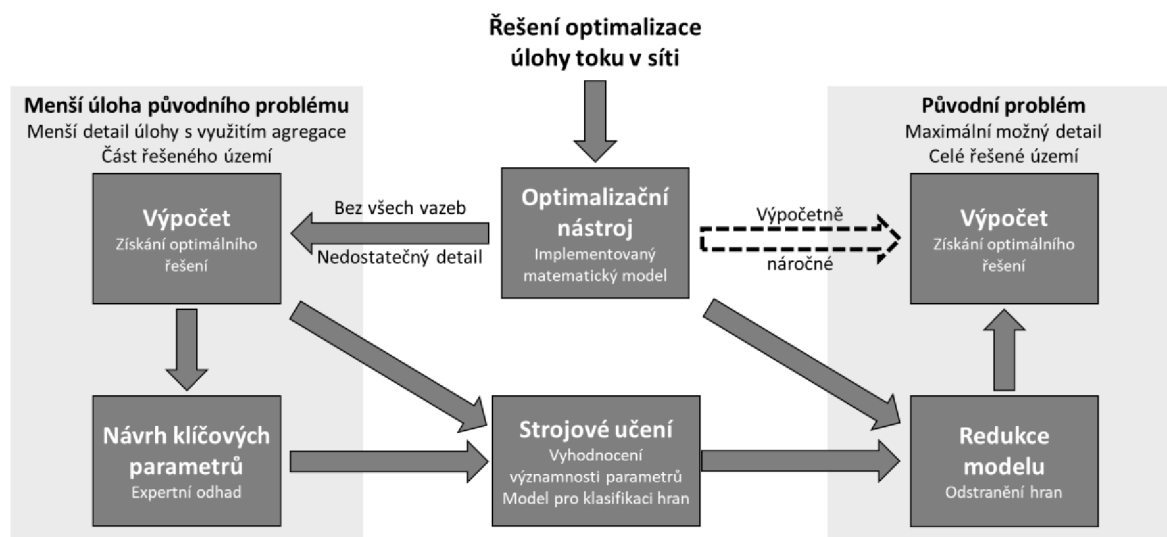
## 5.2 Odebírání hran

Z literární rešerše týkající se řešení rozsáhlých optimalizačních problémů vyplynulo, že současný výzkum směřuje především k aproximaci grafických struktur pomocí agregací, které jsou založeny na shlukové analýze a identifikaci podobností v systému. Pokud jde o detekci výhodných struktur v grafu, studie se zaměřují především na analýzu základních parametrů jeho prvků. V oblasti problému toku v síti a kontextu klasifikace proměnných se nabízí možnost kombinace optimalizace a strojového učení. Oproti častým přístupům na základě výběru optimálních struktur je cílem provést redukci modelu pomocí odebírání

nepravděpodobných řešení. Konkrétně je tato kapitola zaměřena na odstranění nepotřebných hran mezi uzly tak, aby optimální toky byly v přípustné množině řešení ponechány. Popis přístupu včetně verifikační případové studie je publikován v impaktovaném časopise, kde lze také dohledat případné další detaily, viz [A12].

### 5.2.1 Popis přístupu

Cílem je vyvinout přístup, který by mohl pomoci obecně a efektivně řešit rozsáhlé úlohy toku v síti. Klíčové je z modelované struktury odstranit nepotřebné či nevýhodné hrany, které s velkou pravděpodobností nebudou obsaženy v optimálním řešení. K identifikaci těchto struktur je možné využít strojové učení, které však potřebuje tréninkovou množinu, která poslouží jako referenční pro naučení klasifikačního modelu na základě významných parametrů. Taková množina musí splňovat charakter řešeného problému, který však není možné v prvotní fázi vyřešit. Je však možné využít řešení pouze dílčí části problému nebo výpočet s menším detailem. Princip přístupu pro orientované oblouky je ilustrován na Obr. 5.6.



Obr. 5.6: Schéma přístupu k řešení rozsáhlých úloh pomocí odstranění hran.

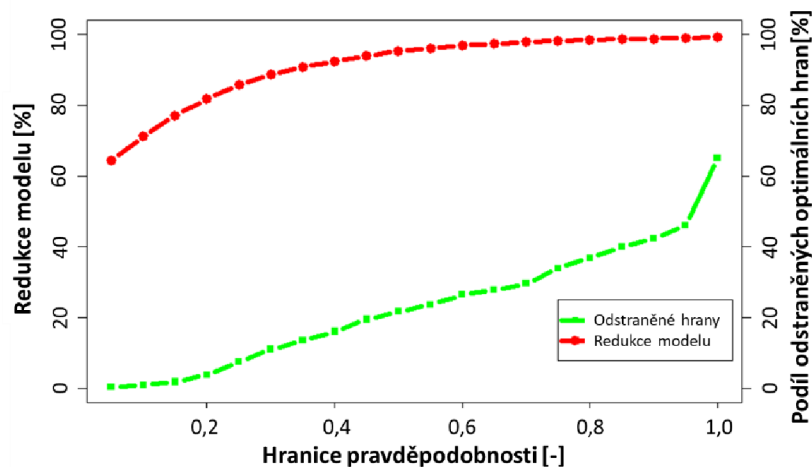
Řešení rozsáhlé optimalizace s podrobnou dopravní sítí obvykle není možné z důvodu vysokých výpočetních nároků, avšak stejný problém lze efektivně řešit s agregovanými daty. Takové výsledky mohou sloužit jako tréninková sada pro strojové učení, neboť podstata problematiky by měla být zachována a identifikace nepotřebných hran by neměla být příliš ovlivněna. Na základě klíčových parametrů lze každou hranu původního problému ohodnotit pravděpodobností, s jakou patří k optimálnímu řešení a následně odstranit ty nepravděpodobné dle potřebné redukce pro vyřešení úlohy. Výhodou tohoto přístupu je, že nedochází k agregaci nebo rozkladu na podproblémy. To umožňuje se vyhnout nesprávným interpretacím nalezených řešení, které mohou vést k významné chybě.

Pro aplikaci strojového učení je třeba shromáždit dostatečné množství dat. Pro potřeby prvních testovacích výpočtů byla vytvořena jednoduchá alokační úloha na úrovni územního členění ORP s různými scénáři vstupních parametrů. Prvním krokem ve vývoji přístupu bylo definovat širokou škálu parametrů a ukazatelů jednotlivých hran a následně zjistit jejich významnost při identifikaci optimálnosti. Úloha byla postavena na bipartitním grafu s hranami představujícími spojení producent – zpracovatel. Jako vhodný klasifikační model pro strojové učení byl vybrán „Random Forest“, který je dobře známý pro svou robustnost a

rychlost bez potřeby ladění parametrů. Konkrétní detaily týkající se popisu popis strojového učení a následné aplikace na testovací úlohu lze nalézt v publikaci [A12], přičemž příslušný klasifikační model byl zpracován jejím prvním autorem. Na základě znalosti optimálního řešení byly identifikovány následující nejvýznamnější kritéria:

- **Relativní pořadí hrany dle ceny v rámci producenta:** Každá hrana v rámci množiny hran spojených s vybraným producentem odpadu je očíslována od nejlevnější po nejdražší.
- **Gradient ceny hran v rámci producenta:** Nejlevnější, respektive nejdražší, hrana vybraného producenta má hodnotu nastavenou na 0, respektive 1. Ostatní hrany spojené s daným producentem jsou dle ceny ohodnoceny příslušnou hodnotou pomocí lineární interpolace.
- **Relativní pořadí hrany dle ceny v rámci zpracovatele:** Každá hrana v rámci množiny hran spojených s vybraným zpracovatelem odpadu je očíslována od nejlevnější po nejdražší.
- **Poměr ceny hrany a nejdražší hrany v systému:** Každá hrana je ohodnocena číslem, které vyjadřuje poměr k nejdražší hraně v celém hodnoceném systému.
- **Gradient poměru mezi cenou a kapacitou v rámci zpracovatele:** Každá hrana je nejprve ohodnocena podílem ceny a kapacity zařízení, se kterým je spojena. Následně jsou hrany vyhodnocovány vždy k jednomu zařízení, kdy hraně s nejmenší, respektive největší, hodnotou je přiřazeno číslo 0, respektive 1. Ostatní hrany jsou ohodnoceny pomocí lineární interpolace.
- **Hustota zpracovatelské kapacity pro producenta:** Hodnota vyjadřuje dostupnost kapacit v okolí vybraného producenta. Číslo je získáno na základě součtu podílů kapacity a vzdálenosti od producenta od všech zpracovatelů.

Tréninkový vzorek představoval 70 % testovacích dat, přičemž byla hodnocena klasifikace zbylých 30 %. Jako klíčové parametry lze považovat zejména cenové ukazatele, které představují hlavní vstup pro účelovou funkci. Jako další je vazba na kapacitu, která naopak definuje řešitelnost úlohy. Tyto ukazatele jsou tak logickým vyústěním definice matematického modelu, avšak důležité v rámci prvotních testů bylo získat jejich vhodné vyjádření. Celkem bylo definováno několik desítek parametrů, avšak ponecháno bylo pouze nejvýznamnějších (výše uvedených) šest. Tím je snížena složitost modelu a zabraňuje se přeučení modelu. Nejlepší dosažené výsledky jsou zobrazeny na Obr. 5.7.



Obr. 5.7: Výsledky klasifikace hran na testovacích datech.

Graf zobrazuje míru redukce úlohy a procento odstraněných optimálních hran v závislosti na zvolené pravděpodobnostní hranici. Tato hranice definuje množinu odstraněných hran, které mají pravděpodobnost menší než zvolená hodnota. Z grafu je patrné, že na základě vybraných parametrů je možné dosáhnout přes 60% redukce původní úlohy bez dopadu na výsledné řešení. Při zvolené hranici 0,2 lze získat až 80% redukci, avšak zde již dochází k odstranění některých optimálních hran. Výsledky testovacích úloh prokázaly, že tento přístup může výrazně přispět k urychlení optimalizace tokových úloh. V následující části je však nutné verifikovat tento přístup na vybraném komplexním modelu a porovnat s dalšími přístupy k redukci rozsáhlých úloh.

### 5.2.2 Ukázka řešení

Podobně jako v případě redukce úlohy pomocí shlukování byl vybrán k verifikaci model z kapitoly 4.3. Oproti shlukování však nebyla případová studie doplněna o předkládací stanice a byl tak využit původní model. Pro zaručení, že úloha bude řešitelná i v případě řešení v detailu obcí, byly některé aproximace pomocí SOS proměnných modelovány v menším detailu, tj. bylo využito méně bodů pro po částech lineární funkci. Zároveň byl snížen počet uvažovaných scénářů na pouhé dva s tím rozdílem, že zde nebyl využit pre-processing při tvorbě dopravní sítě z pohledu napojení na skládky (v původní úloze byla uvažována pouze nejbližší skládka) a jsou tak zohledněny veškeré hrany v rámci povolených toků producent – zpracovatel. Celkově je však značně snížena výpočtová náročnost modelu na pouhou jednu desetinu (oproti původní úloze prezentované v kapitole 5.1.7), jelikož hlavním kritériem pro náročnost modelu je počet celočíselných proměnných. Konkrétní detaily matematických modelů lze nalézt v Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Porovnání dopadu různého detailu na parametry modelu a výsledky optimalizace.

Detail řešené úlohy	Počet rovnic / Počet proměnných	Výpočetní čas	Účelová funkce [tisíc EUR]	Kapacita ZEVO [kt]	Umístění ZEVO / Optimální umístění
ORP (206)	5 719 / 177 307	31 s	501 993	2 981	16 / 15
Obce (6 258)	42 031/5 297 299	11 019 s	509 181	3 261	18 / 18

Matematický model v detailu obcí obsahuje přes 2,6 milionu hran a kvůli zohlednění 2 scénářů odpovídá celkový počet proměnných přibližně dvojnásobku. Jedná se o úlohu, která je 30krát větší než agregovaný model v detailu ORP. Dopad vybraného detailu na výsledky lze jasně pozorovat na strategických rozhodnutích souvisejících se zařízeními pro energetické využití odpadu. V detailu ORP model doporučuje pouze 16 ZEVO s celkovou roční kapacitou 2 981 kt, kde 15 lokalit odpovídá stejnému umístění, jako byla navržena při výpočtu v detailu obcí. Ve výsledku tak tři optimální zařízení byla vynechána a jedno ZEVO je plánováno na nevhodném místě.

Následující část je věnována redukci dopravní sítě na základě přístupu z literární rešerše, konkrétně se jedná o odstranění hran v závislosti na jejich délce. Lze předpokládat, že kvůli povaze problému jsou kratší hrany pravděpodobněji využívány a transport na delší vzdálenosti bude realizován pouze v případě nedostatečnosti kapacit. Následující Tab. 5.2 ukazuje jednotlivé výpočty, kde je nejprve uveden původní problém a poté jsou hrany v modelu postupně odstraňovány.



Tab. 5.2: Výsledky redukce modelu při odstranění hran na základě vzdálenosti.

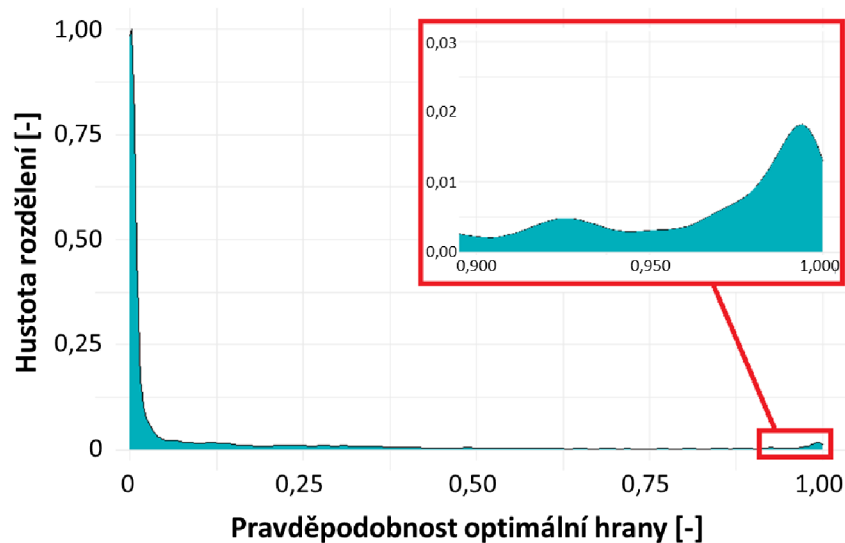
Maximální vzdálenost	Podíl hran v modelu	Odebrané optimální hrany	Výpočetní čas	Změna účelové funkce	Kapacita ZEVO [kt]	Umístění ZEVO / Optimální umístění
612 km	100 %	0 / 0 %	11 019 s	0 %	3 261	18 / 18
297 km	80 %	0 / 0 %	13 061 s	0 %	3 261	18 / 18
222 km	60 %	0 / 0 %	10 115 s	0 %	3 261	18 / 18
163 km	40 %	29 / 0,14 %	4 810 s	9E-4 %	3 251	18 / 18
106 km	20 %	1 491 / 7,3 %	10 927 s	0.26 %	3 291	20 / 18
72 km	10 % *	5 546 / 27 %	36 000 s	2.38 %	2 951	32 / 14
50 km	5 % **	10 931 / 53 %	-	-	-	-

\* Optimalizace redukované úlohy dosáhla časového limitu 36 000 sekund.

\*\* Redukovaná úloha je neřešitelná.

Myšlenka použitá pro odstranění hran na základě vzdálenosti představuje přímý přístup, který nevyžaduje další složitý aparát, a proces redukce je tak vůči samotné optimalizaci zanedbatelný. Tímto přístupem lze dosáhnout redukce původního problému o 60 % bez výrazného ovlivnění řešení, zejména v případě strategických rozhodnutí. Je však důležité poznamenat, že další redukce přes tuto hranici může vést již k nežádoucím důsledkům, jako je nesprávné umístění zařízení a zvýšení doby výpočtu. Nárůst časové náročnosti v případě další redukce je způsoben zejména nekonzistencí prohledávané množiny, přičemž řešící algoritmus „Branch and Bound“ má problémy při odřezávání prohledávaného stromu řešení.

Předchozí jednoduchá metodika může zajistit řešitelnost úlohy, kdy výpočetní čas je snížen přibližně na jednu polovinu. Avšak z pohledu komplexních problémů je nutné dosahovat lepších výsledků, a proto byl vytvořen nový přístup s využitím strojového učení. Uvažované ukazatele pro klasifikaci hran jsou ponechány stejné jako v testovacích výpočtech, přičemž tréninková množina je tvořena výsledky optimalizace v detailu ORP. Klasifikační model je vytvořen pro každou komoditu separátně, kdy jednotlivé proudy odpadu a jejich odpovídající optimální hrany se mohou lišit na základě svých specifík (např. kvůli omezení toku na skládku). Tímto přístupem je snížena nejistota parametrů v klasifikačním procesu, která by mohla vést k nesprávnému vyhodnocení. Následně byl vytvořený model aplikován na infrastrukturu obcí. Samotný proces klasifikace trvá 30 sekund, což vzhledem k době řešení původního problému v řádu hodin lze považovat za zanedbatelné. Hustota pravděpodobnosti je zobrazena na Obr. 5.8.



Obr. 5.8: Hustota rozdělení pravděpodobnosti optimality hran.

Klasifikační model založený na strojovém učení ohodnotil většinu hran jako neoptimální s hodnotou do hranice 0,05. Další vrchol lze nalézt okolo pravděpodobnosti 1, kde by měly být přítomny naopak optimální hrany. Velikost těchto vrcholů je zcela odlišný kvůli poměru celkového počtu hran v systému a těch optimálních. V dalším kroku je vyhodnocena redukce na základě zvolených hranic pravděpodobnosti a analýze dopadů na výsledné řešení optimalizace. Dílčí výsledky jsou uvedeny v Tab. 5.3.

Tab. 5.3: Výsledky redukce modelu při odstranění hran na základě klasifikačního modelu.

Hranice	Podíl hran v modelu	Odebrané optimální hrany	Výpočetní čas	Změna účelové funkce	Kapacita ZEVO [kt]	Umístění ZEVO / Optimální umístění
0	100 %	0 / 0 %	11 019 s	0 %	3 261	18 / 18
0,015	20 %	0 / 0 %	6 062 s	0 %	3 261	18 / 18
0,045	15 %	3 / 0,015 %	3 091 s	1E-5 %	3 261	18 / 18
0,177	10 %	15 / 0,074 %	1 318 s	6E-5 %	3 261	18 / 18
0,425	5 %	144 / 0,71 %	718 s	9E-4 %	3 261	18 / 18
0,549	4 %	268 / 1,3 %	569 s	0,32 %	3 281	20 / 18
0,749	3 % *	638 / 3,1 %	218 s	0,24 %	3 301	19 / 17
0,93	2 % *	2 042 / 10 %	85 s	2,65 %	3 421	21 / 17

\* Za podmínky ponechání alespoň jedné hrany z každého produkčního uzlu.

Při srovnání výsledků dvou přístupů jednoznačně vyplývá, že pomocí strojového učení lze dosáhnout významnější redukce než pomocí odstranění na základě vzdáleností. Uvedený vrchol na Obr. 5.8 okolo pravděpodobnosti 0 neobsahuje téměř žádnou optimální hranu. Velikost modelu tak může být snížena na pouhých 15 % bez změny účelové funkce a se snížením výpočetního času téměř na jednu čtvrtinu. Další redukce je stále možná, avšak již dochází k významnějšímu odstraňování optimálních hran. Odstranění malé části optimálních hran však nemá příliš velký dopad na účelovou funkci a ani na strategická rozhodnutí, jelikož v úloze byly vždy ponechány podobně výhodné alternativy. To je způsobeno charakteristikou řešené úlohy, kdy realokace toku odpadu z hraničních oblastí mezi zařízeními nepředstavuje významný zásah do modelu. Maximální možná redukce je dosažena kolem hranice 0,5, kdy výsledný model má přibližně stejnou velikost jako v případě řešení úlohy v detailu ORP. Při dalším odstranění hran již úlohy nemají řešení především kvůli odstranění všech hran u některých producentů. Nicméně, pokud je přidána podmínka, aby byla vždy ponechána nejpravděpodobnější hrana ke každému zpracovateli, je možné redukovanou úlohu dále řešit, ale již dochází k významnému ovlivnění výsledků a změny lokalizace ZEVO.

### 5.3 Shrnutí a diskuze

Představené přístupy jsou vyvíjeny za účelem redukce rozsáhlých problémů toku v síti, které z obecného pohledu mohou pokrývat mnoho aplikací v reálném světě, zejména v logistice (sběr, distribuce zboží) a plánování infrastruktury. Nicméně uvedené myšlenky či přístupy mohou být aplikovány při vhodné modifikaci i na jiné typy úloh, kde lze předpokládat velký počet nulových proměnných. Je klíčové také blíže analyzovat větší rozsah monitorovaných parametrů s ohledem na specifické výzvy reálných problémů. Neobvyklá omezení nebo nelinearity, které je třeba zohlednit, mohou představovat problém při klasifikaci proměnných či agregaci uzlů. Úlohy řešené algoritmy bez garance optimálního řešení je tak nutné v navazujícím vývoji blíže analyzovat a současný aparát je tak vhodný využívat pouze pro lineární úlohy s celočíselnými proměnnými.

Zároveň je však důležité poznamenat, že složitost úlohy pro ověření přístupu k odebírání hran není velká a při zohlednění dalších prvků systému, jako jsou překládací stanice, mohou být výsledky odlišné. Význam a možnosti redukce modelu pro tokové úlohy se však zvyšuje s rozsahem problémů, zejména s počtem zpracovatelských zařízení. Každá obec obvykle využívá pouze jednu hranu pro každý typ odpadu, zatímco v původním modelu jsou zohledněny všechny možné trasy do všech uvažovaných zařízení. Lze proto očekávat, že v případě potenciálního ZEVO v každém ORP by mohla redukce problému v detailu obcí vést dokonce ještě k mnohem menší úloze než právě výpočet v detailu ORP. Dalším klíčovým prvkem je podrobná analýza odstranění prvních optimálních hran, aby bylo možné určit důvody pro toto rozhodnutí a definovat případné nové podmínky. Tyto nové poznatky mohou přispět ke zlepšení efektivity vyvinutého přístupu.

V případě shlukování uzlů pro získání variabilního detailu vzhledem k oblastem zájmu se další vývoj bude zaměřovat především na přesnější modelování oblastí mezi konkurujícími subjekty. V určitých typech problémů, jako je analýza dostupnosti odpadu, může být důležitější modelovat oblast na hranici sběrných oblastí jednotlivých zařízení. Tato hranice však nemá přesně definovanou polohu, a intuitivní oblast uprostřed mezi subjekty může být ovlivněna dalšími parametry. Budoucí výzkum se rovněž zaměří na shlukovací algoritmy s asymetrickou maticí vzdáleností, což by pomohlo lépe integrovat klíčové aspekty řešeného problému. Nakonec je nutné se věnovat podrobnější analýze výpočetní náročnosti a přesně kvantifikovat výhody použité metodologie při různých typech úkolů. Řešení různých praktických problémů může také přinést další pokrok ve vývoji přístupů k redukci.

## 6 ZÁVĚR

Dizertační práce představila sadu nových matematických modelů založených především na problematice toku v síti, která umožňuje efektivně modelovat systém OH při přechodu na ObH. Cílem vyvinutých nástrojů je zejména poskytnout vzhled do analyzovaného systému, vyhodnocovat různé scénáře a optimalizovat infrastrukturu pro zpracování odpadu. Součástí plánovacích modelů (viz kapitola 4) je také systematická práce s evidovanými daty (viz kapitola 3), jež představují klíčový vstup pro následnou optimalizaci a návrh příslušných kapacit v jednotlivých regionech. Motivace ke vzniku těchto nástrojů vyplývá z řešení výzkumných projektů na UPI, komerčních zakázek v oblasti OH a také absencí příslušných matematických modelů navázaných na praktické problémy v akademické sféře.

Budoucí výzkum a vývoj nových podpůrných nástrojů bude zaměřen zejména na projekt CEVOOH. Dosažené výsledky a výstupy pomohly identifikovat další oblasti možného vývoje týkajícího se zejména efektivní správy dat, rekonstrukce toku a poskytnutí nových informací s využitím stejné evidence odpadů. Modely pro plánování infrastruktury v OH je důležité také dále rozvíjet, zejména pak poskytnout větší detail jednotlivým subjektům i v menším časovém intervalu. Následně by mohly být integrovány do úloh plánování svozu odpadu, tvorby harmonogramu a simulací, které by poskytly vyhodnocení při zahrnutí vybraných nových projektů. Klíčové je dále vyvinuté modely implementovat do ucelených nástrojů či aplikací, jež by umožnily jejich širší využití v praxi. V navazující činnosti tak budou řešeny primárně následující body:

- Představený model vyrovnání dat pro rekonstrukci evidovaných dat produkce a nakládání s odpady je nutné rozšířit pro další analýzy o identifikátor původce odpadu. Za tímto účelem bude nutné navrhnout novou strukturu modelu a zvážit kombinaci lineární a kvadratické účelové funkce. Následně bude nutné definovat novou matici vah, přičemž může být přínosné zabývat se i váhami mimo diagonálu představující možné řetězení chyb způsobené komunikací mezi subjekty. Vzhledem k omezenému množství informací vhodných k tvorbě vah může zlepšení nástroje přinést analýza meziročních výkazů i jiných katalogových čísel odpadu. Váha vybraného subjektu by tedy reflektovala dlouhodobý trend a chování v rámci evidence v celém systému OH.
- Při analýzách systému a výpočtu indikátorů často představuje problém neexistence informace o kompletním toku od producenta až ke konečnému zpracovateli. Důsledkem toho mohou některé indikátory pro kraje v součtu dosahovat více než 100 %, jelikož původ odpadů není znám kvůli předání odpadu mezi subjekty. Pro vyhodnocení efektivity OH tak může být přínosné poskytnout odhad včetně vyjádření nejistoty ohledně celého řetězce v rámci uvažovaného systému.
- V evidenci OH se vyskytují kódy nakládání úprav, po kterých odpad přechází do skupiny tzv. sekundárních odpadů. Úpravy mají své kategorie s následnou preferencí určitého typu nakládání, které však není vždy realizováno. Je proto nutné detailněji analyzovat vazby mezi primárním a sekundárním odpadem, aby bylo možné odpovídající část těchto úprav zohlednit v indikátorech OH.
- Uvedené modely pro podporu plánování OH je nutné společně s přístupy k redukci modelu implementovat do uceleného nástroje. To umožní efektivně řešit úlohy v řádném detailu a vyhodnocovat přínos dílčích projektů. Současně je však nutné modely dále rozšiřovat, například o zmíněnou multimodální dopravu, která může přispět k větší efektivitě transportu odpadu.

## 7 PUBLIKAČNÍ ČINNOST

### Články v impaktovaných časopisech

Reference	Hodnocení časopisu podle Web of Science	Podíl na autorství dle systému Apollo
PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; SZÁSZIOVÁ, L.; SUJA, J.; PAVLAS, M. Post-consumer plastic sorting infrastructure improvements planning: Scenario-based modeling of greenhouse gas savings with sustainable costs. <i>Journal of Environmental Management</i> , 2023, 325, 116567. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116567.	<b>Q1</b> IF 2022 8,7	50 %
PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; NĚMCOVÁ, L.; VALTA, J.; PAVLAS, M. Mathematical Modelling of Waste Flows and Treatment Based on Reconstruction of Historical Data: Case of Wastewater Sludge in Czech Republic. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 2023, 420, 138393. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138393.	<b>Q1</b> IF 2022 11,1	45 %
PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; HRABEC, D.; NEVRLÝ, V.; HVATTUM, L. M. Optimal location and operation of waste-to-energy plants when future waste composition is uncertain. <i>Operational Research</i> , 2022, 22, 5765–5790. DOI: 10.1007/s12351-022-00718-w.	<b>Q2</b> IF 2022 2,7	45 %
ROSECKÝ, M.; PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R. Network Flow Problem Heuristic Reduction Using Machine Learning. <i>Optimization and Engineering</i> , 2023. DOI: 10.1007/s11081-023-09838-4.	<b>Q2</b> IF 2022 2,1	45 %
PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; SMEJKALOVÁ, V.; PAVLAS, M. Strategic decisions leading to sustainable waste management: Separation, sorting and recycling possibilities. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 2021, 278, 123359. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123359.	<b>Q1</b> IF 2022 11,1	37 %
ZACH, B.; PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; JADRNÝ, J.; ŠYC, M. Tool for optimization of energy consumption of membrane-based carbon capture. <i>Journal of Environmental Management</i> , 2023, 320, 115913. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115913.	<b>Q1</b> IF 2022 8,7	35 %
ŠOMPLÁK, R.; KROPÁČ, J.; PLUSKAL, J.; PAVLAS, M.; URBÁNEK, B.; VÍTKOVÁ, P. A Multi-Commodity Mathematical Modelling Approach—Hazardous Waste Treatment Infrastructure Planning in the Czech Republic. <i>Sustainability</i> , 2022, 14, 3563. DOI: 10.3390/su14063536.	<b>Q2</b> IF 2022 3,9	25 %

SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; PLUSKAL, J.; RYBOVÁ, K. Hierarchical optimisation model for waste management forecasting. Optimization and Engineering, 2022, 23, 2143-2175. DOI: 10.1007/s11081-022-09735-2.	<b>Q2</b> IF 2022 2,1	15 %
KŮDELA, J.; SUJA, J.; ŠOMPLÁK, R.; PLUSKAL, J.; HRABEC, D. Optimal Control of Combined Heat and Power Station Operation. Optimization and Engineering, 2023. DOI: 10.1007/s11081-023-09848-2.	<b>Q2</b> IF 2022 2,1	5 %
NEVRLÝ, V.; ŠOMPLÁK, R.; SZÁSZIOVÁ, L.; PLUSKAL, J.; PROCHÁZKA, V. Offshore Conceptual Plastic Waste Collection and Treatment Towards Clean Ocean. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12, 6523-6541. DOI: 10.1007/s12649-021-01474-2.	<b>Q3</b> IF 2022 3,2	5 %

### Články indexované v databázi Scopus

Reference	Podíl na autorství dle systému Apollo
PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; NEVRLÝ, V.; TUREK, V. Mixing approach to waste composition and its lower heating value impact on waste-to-energy plant. Chemical Engineering Transactions, 2020, 81, 751-756. DOI:10.3303/CET2081126.	40 %
PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; KŮDELA, J. Novel Approaches for Transport Infrastructure Reduction to Effective Optimisation of Flow Tasks. Chemical Engineering Transactions, 2021, 88, 463-468. DOI: 10.3303/CET21880777.	33 %
ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; NEVRLÝ, V.; PLUSKAL, J.; PAVLAS, M. Implementation of circular economy through the mathematical programming for the complex system evaluation. Chemical Engineering Transactions, 2019, 76, 523-528. DOI:10.3303/CET1976088.	20 %
VÁCLAVKOVÁ, Š.; PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; TALPA, J.; SMEJKALOVÁ, V. Resolving discrepancies in reported flow amounts in sewage sludge management network datasets by mathematical programming. Chemical Engineering Transactions, 2020, 81, 745-750. DOI: 10.3303/CET2081125.	15 %

## REFERENCE

### A – Publikace autora a projekty na ÚPI

- [A1] SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; PLUSKAL, J.; RYBOVÁ, K. Hierarchical optimisation model for waste management forecasting. *Optimization and Engineering*, 2022, 23, 2143-2175. DOI:10.1007/s11081-022-09735-2.
- [A2] Centrum kompetence pro energetické využití odpadu. TE02000236. TAČR. Doba řešení: 2014-2018.
- [A3] SPETEP. Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008413. Dobra řešení: 2018-2022.
- [A4] PLUSKAL, J. Pokročilé optimalizační modely v oblasti oběhového hospodářství. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav matematiky, 2019. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/115997>.
- [A5] OPŽP. Podklady pro oblast podpory odpadového hospodářství a oběhového hospodářství jako součást Programového dokumentu v Operačním programu Životní prostředí 2021–2027. 2020. Operační program Životní prostředí. Dostupné z: <https://www.opzp.cz/>
- [A6] CEVOOH. Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost. SS02030008. TAČR. Doba řešení. 1.1.2021 – 31.12.2026
- [A7] PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; SMEJKALOVÁ, V.; PAVLAS, M. Strategic decisions leading to sustainable waste management: Separation, sorting and recycling possibilities. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278, 123359. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123359.
- [A8] PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; NĚMCOVÁ, L.; VALTA, J.; PAVLAS, M. Mathematical Modelling of Waste Flows and Treatment Based on Reconstruction of Historical Data: Case of Wastewater Sludge in Czech Republic. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 420, 138393. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138393.
- [A9] PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; HRABEC, D.; NEVRLÝ, V.; HVATTUM, L. M. Optimal location and operation of waste-to-energy plants when future waste composition is uncertain. *Operational Research*, 2022, 22, 5765–5790. DOI: 10.1007/s12351-022-00718-w.
- [A10] PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R.; SZÁSZIOVÁ, L.; SUJA, J.; PAVLAS, M. Post-consumer plastic sorting infrastructure improvements planning: Scenario-based modeling of greenhouse gas savings with sustainable costs. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325, 116567. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116567.
- [A11] ŠOMPLÁK, R.; KROPÁČ, J.; PLUSKAL, J.; PAVLAS, M.; URBÁNEK, B., VÍTKOVÁ, P. A Multi-Commodity Mathematical Modelling Approach—Hazardous Waste Treatment Infrastructure Planning in the Czech Republic. *Sustainability*, 2022, 14, 3563. DOI: 10.3390/su14063536.

[A12] ROSECKÝ, M.; PLUSKAL, J.; ŠOMPLÁK, R. Network Flow Problem Heuristic Reduction Using Machine Learning. *Optimization and Engineering*, 2023. DOI: 10.1007/s11081-023-09838-4.

## **B – Odborná literatura**

[B1] D'ADAMO, I.; MAZZANTI, M.; MORONE, P.; ROSA, P. Assessing the relation between waste management policies and circular economy goals. *Waste Management*, 2022, 154, 27-35. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.09.031.

[B2] KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 135, 190-201. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034.

[B3] STOEVA, K.; ALRIKSSON, S. Influence of recycling programmes on waste separation behaviour. *Waste Management*, 2017, 68, 732-741. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.005.

[B4] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/850 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů (Text s významem pro EHP).

[B5] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/851 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech (Text s významem pro EHP).

[B6] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/852 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 94/62/ES o obalech a obalových odpadech (Text s významem pro EHP).

[B7] BROUWER, M. T.; THODEN VAN VELZEN, E. U.; AUGUSTINUS, A.; SOETHOUDT, H.; DE MEESTER, S.; RAGAERT, K. Predictive model for the Dutch post-consumer plastic packaging recycling system and implications for the circular economy. *Waste Management*, 2018, 71, 62-85. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.10.034.

[B8] ABUBAKAR, I. R.; MANIRUZZAMAN, K. M.; DANO, U. L.; ALSHIHRI, F. S.; ALSHAMMARI, M. S.; AHMED, S. M. S.; AL-GEHLANI, W. A. G.; ALRAWAF, T. I. Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19, 12717. DOI: 10.3390/ijerph191912717.

[B9] PIETZSCH, N.; RIBEIRO, J. L. D.; DE MEDEIROS, J. F. Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review. *Waste Management*, 2017, 67, 324-353. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.05.004.

[B10] TIERNEY, J. The reign of recycling. *The New York Times*, 2015.

[B11] NASH, J. California's recycling crisis sends billions of bottles and cans into landfills. *Bloomberg Businessweek*, 2016.



- [B12] SINGH, G.; RIZWANULLAH, M. Combinatorial optimization of supply chain Networks: A retrospective & literature review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62, 1636-1642. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.366.
- [B13] Informační systém odpadového hospodářství ISOH. Česká informační agentura životního prostředí, 2022. Dostupné z: <https://www.cenia.cz/odpadove-a-obehove-hospodarstvi/isoh/>
- [B14] Zákon č. 541/2020 Sb. O odpadech. Cit. 20.5.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>.
- [B15] SILERYTE, R.; SABBE, A.; BOUZAS, V.; MEISTER, K.; WANDL, A.; VAN TIMMEREN, A. European Waste Statistics data for a Circular Economy Monitor: Opportunities and limitations from the Amsterdam Metropolitan Region. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 358, 131767. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131767.
- [B16] SEPASGOZAR, S. M. E.; FRANCES MAIR, D.; TAHMASEBINIA, F.; SHIROWZHAN, S.; LI, H.; RICHTER, A.; YANG, L.; XU, S. Waste management and possible directions of utilising digital technologies in the construction context. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 324, 129095. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129095.
- [B17] TSAI, F. M.; BUI, T.-D.; TSENG, M.-L.; LIM, M. K.; HU, J. Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275, 124132. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124132.
- [B18] EGHBALI, H.; ARKAT, J.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. Sustainable supply chain network design for municipal solid waste management: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 381, 135211. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135211.
- [B19] ISLAM, M. T.; HUDA, N. Material flow analysis (MFA) as a strategic tool in E-waste management: Applications, trends and future directions. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244, 344-361. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.062.
- [B20] CÂMARA, M.; SOARES, R.; FEITAL, T.; ANZAI, T.; DIEHL, F.; THOMPSON, P.; PINTO, J. Numerical Aspects of Data Reconciliation in Industrial Applications. *Processes*, 2017, 5, 56. DOI: 10.3390/pr5040056.
- [B21] BROWN, A. W.; KAISER, K. A.; ALLISON, D. B. Issues with data and analyses: Errors, underlying themes, and potential solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115, 2563-2570. DOI: 10.1073/pnas.1708279115.
- [B22] BOWMAN, G.; AYED, L.; BURG, V. Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland in the context of the circular economy. *Bioresource Technology Reports*, 2022, 20, 101273. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101273.
- [B23] KIM, M.; CHANG, J. W.; PARK, K.; YANG, D. R. Comprehensive assessment of the effects of operating conditions on membrane intrinsic parameters of forward osmosis (FO) based on principal component analysis (PCA). *Journal of Membrane Science*, 2022, 641, 119909. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119909.

- [B24] CHAO, G.; SUN, J.; LU, J.; WANG, A.-L.; LANGLEBEN, D. D.; LI, C.-S.; BI, J. Multi-view cluster analysis with incomplete data to understand treatment effects. *Information Sciences*, 2019, 494, 278-293. DOI: 10.1016/j.ins.2019.04.039.
- [B25] CHEN, Y.; YUAN, Z.; CHEN, B. Process optimization with consideration of uncertainties—An overview. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, 26, 1700-1706. DOI: 10.1016/j.cjche.2017.09.010.
- [B26] KUEHN, D. R.; DAVIDSON, H. *Computer Control II. Mathematics of Control. Chemical Engineering Process*, 1961, 57, 44-47.
- [B27] COCHINWALA, M.; KURIEN, V.; LALK, G.; SHASHA, D. Efficient data reconciliation. *Information Sciences*, 2001, 137, 1-15. DOI: 10.1016/S0020-0255(00)00070-0.
- [B28] SHARMA, R.; AGRAWAL, D.; KODAMANA, H. Data reconciliation frameworks for dynamic operation of hybrid renewable energy systems. *ISA Transactions*, 2022, 128, 424-436. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.12.006.
- [B29] YU, J.; HAN, W.; CHEN, K.; LIU, P.; LI, Z. Gross error detection in steam turbine measurements based on data reconciliation of inequality constraints. *Energy*, 2022, 253, 124009. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124009.
- [B30] BADINGS, T. S.; VAN PUTTEN, D. S. Data validation and reconciliation for error correction and gross error detection in multiphase allocation systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195, 107567. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107567.
- [B31] GUREVICH, Y. G.; GUREVICH, A.; GUREVICH, H. Geometrical Interpretation of Data Reconciliation and Uncertainty Reduction in Multi-Sensor Systems. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4098750.
- [B32] BEHNAMI, A.; ZOROUFCHI BENIS, K.; SHAKERKHATIBI, M.; FATEHIFAR, E.; DERAFSHI, S.; CHAVOSHBASHI, M. M. Integrating data reconciliation into material flow cost accounting: The case of a petrochemical wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 218, 616-628. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.218.
- [B33] ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; SMEJKALOVÁ, V.; ŠMÍDOVÁ, Z.; PAVLAS, M. Bulky waste for energy recovery: Analysis of spatial distribution. *Energy*, 2019, 181, 827-839. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.175>.
- [B34] DI FONZO, T.; GIROLIMETTO, D. Forecast combination-based forecast reconciliation: Insights and extensions. *International Journal of Forecasting*, 2022. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2022.07.001.
- [B35] PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; NEVRLÝ, V.; ZAVÍRALOVÁ, L.; KŮDELA, J.; POPELA, P. Spatially distributed generation data for supply chain models – Forecasting with hazardous waste. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161, 1317-1328. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.107.

- [B36] LI, J.; PANCHABIKESEAN, K.; YU, Z.; HAGHIGHAT, F.; MANKIBI EL, M.; CORGIER, D. Systematic data mining-based framework to discover potential energy waste patterns in residential buildings. *Energy and Buildings*, 2019, 199, 562-578. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.07.032.
- [B37] LI, P.; SHIH, H.; MA, H. Applying probabilistic material flow analysis for quality control and management of waste recycling in steelmaking. *Waste Management*, 2022, 144, 67-75. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.03.011.
- [B38] VAN ENGELAND, J.; BELIËN, J.; DE BOECK, L.; DE JAEGER, S. Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega*, 2022, 91, 102012. DOI: 10.1016/j.omega.2018.12.001.
- [B39] HU, CH.; LIU, X.; LU, J. A bi-objective two-stage robust location model for waste-to-energy facilities under uncertainty. *Decision Support Systems*, 2017, 99, 37-50. DOI: 10.1016/j.dss.2017.05.009.
- [B40] BOCCIA, M.; CRAINIC, G. T.; SFORZA, A.; STERLE, C. Multi-commodity location-routing: Flow intercepting formulation and branch-and-cut algorithm. *Computers & Operations Research*, 2018, 89, 94-112. DOI: 10.1016/j.cor.2017.08.013.
- [B41] BOONMEE, C.; ARIMURA, M.; ASADA, T. Location and allocation optimization for integrated decisions on post-disaster waste supply chain management: On-site and off-site separation for recyclable materials. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31, 902-917. DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.07.003.
- [B42] FARROKHI-ASL, H.; MAKUI, A.; JABBARZADEH, A.; BARZINPOUR, F. Solving a multi-objective sustainable waste collection problem considering a new collection network. *Operational Research International Journal*, 2020, 20, 1977-2015. DOI: 10.1007/s12351-018-0415-0.
- [B43] YADAV, V.; KARMAKAR, S.; DIKSHIT, A. K.; BHURJEE, A. K. Interval-valued facility location model: An appraisal of municipal solid waste management system. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171, 250-263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.233.
- [B44] SON, H. L.; LOUATI, A. Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste Management*, 2016, 52, 34-49. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.03.041.
- [B45] AMIN, H. S.; ZHANG, G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37, 4165-4176. DOI: 10.1016/j.apm.2012.09.039.
- [B46] XU, Z.; ELOMRI, A.; POKHAREL, S.; ZHANG, Q.; MING, X. G.; LIU, W. Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. *Waste Management*, 2017, 64, 358-370. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.024.

- [B47] ASEFI, H.; LIM, S. A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166, 1131-1143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.061.
- [B48] NEVRLÝ, V.; ŠOMPLÁK, R.; PUTNA, O.; PAVLAS M. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239, 118003. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118003.
- [B49] HABIBI, F.; ASADI, E.; SADJADI, S. J.; BARZINPOUR, F. A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166, 816-834. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.063.
- [B50] MOHAMMADI, M.; JÄMSÄ-JOUNELA, S.; HARJUNKOSKI, I. Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, 123, 155-169. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.12.022.
- [B51] CIMPAN, C.; MAUL, A.; JANSEN, M.; PRETZ, T.; WENZEL, H. Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling. *Journal of Environmental Management*, 2015, 156, 181-199. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.03.025.
- [B52] MARINAKIS, V.; DOUKAS, H.; XIDONAS, P.; ZOPOUNIDIS, C. Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan. *Omega*, 2017, 69, 1-16. DOI: 10.1016/j.omega.2016.07.005.
- [B53] AĞBULUT, Ü.; SARIDEMIR, S.; ALBAYRAK, S. Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41, 389-400. DOI: 10.1007/s40430-019-1891-8.
- [B54] ZHOU, H.; LONG, Y.; MENG, A.; LI, Q.; ZHANG, Y. Classification of municipal solid waste components for thermal conversion in waste-to-energy research. *Fuel*, 2015, 145, 151-157. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.015.
- [B55] BILGEN, S.; KELEŞ, S.; KAYGUSUZ, K. Calculation of higher and lower heating values and chemical exergy values of liquid products obtained from pyrolysis of hazelnut cupulae. *Energy*, 2012, 41, 380-385. DOI: 10.1016/j.energy.2012.03.001.
- [B56] HLA, S. S.; ROBERTS, D. Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane, Australia. *Waste Management*, 2015, 41, 12-19. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.03.039.
- [B57] DOLEŽALOVÁ, M.; BENEŠOVÁ, L.; ZÁVODSKÁ, A. The changing character of household waste in the Czech Republic between 1999 and 2009 as a function of home heating methods. *Waste Management*, 2013, 33, 1950-1957. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.04.017.

- [B58] GARCÉS, D.; DÍAZ, E.; SASTRE, H.; ORDÓÑEZ, S.; GONZÁLEZ-LAFUENTE, J. M. Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels. *Waste Management*, 2016, 47, 164-173. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.08.029.
- [B59] SIPILÄ, K. Cogeneration, biomass, waste to energy and industrial waste heat for district heating. *Advanced District Heating and Cooling Systems*, 2016, 45–73. DOI: 10.1016/B978-1-78242-374-4.00003-3.
- [B60] SHI, H.; MAHINPEY, N.; AQSHA, A.; SILBERMANN, R. Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, 2016, 48, 34-47. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.036.
- [B61] TIRKOLAEI, E. B.; MAHDAVI, I.; ESFAHANI, M. M. S.; WEBER, G-W. A robust green location-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty. *Waste Management*, 2020, 102, 340-350. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.10.038.
- [B62] HANNAN, M. A.; HOSSAIN LIPU, M.S.; AKHTAR, M.; BEGUM, R. A.; AL MAMUN, M. A.; HUSSAIN, A.; MIA, M. S.; BASRI, H. Solid waste collection optimization objectives, constraints, modeling approaches, and their challenges toward achieving sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277, 123557. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123557.
- [B63] ATABAKI, M. S.; MOHAMMADI, M.; NADERI, B. New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146, 106520. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106520.
- [B64] WU, J.; MA, CH.; ZHANG, D.; XU, Y. Municipal solid waste management and greenhouse gas emission control through an inexact optimization model under interval and random uncertainties. *Engineering Optimization*, 2018, 50, 1963-1977. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1419347.
- [B65] CHENG, G.; HUANG, G.; DONG, C.; XU, Y.; CHEN, J.; CHEN, X.; LI, K. Distributed mixed-integer fuzzy hierarchical programming for municipal solid waste management. Part I: System identification and methodology development. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24, 7236-7252. DOI: 10.1007/s11356-016-8284-7.
- [B66] CHENG, G.; HUANG, G.; DONG, C.; XU, Y.; CHEN, J.; CHEN, X. Distributed mixed-integer fuzzy hierarchical programming for municipal solid waste management. Part II: scheme analysis and mechanism revelation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24, 8711-8721. DOI: 10.1007/s11356-017-8574-8.
- [B67] JAMMELI, H.; ARGOUBI, M.; MASRI, H. A Bi-objective stochastic programming model for the household waste collection and transportation problem: case of the city of Sousse. *Operational Research International Journal*, 2021, 21, 1613-1619. DOI: 10.1007/s12351-019-00538-5.

- [B68] ZHEN, L.; SUN, Q.; WANG, K.; ZHANG, X. Facility location and scale optimisation in closed-loop supply chain. *International Journal of Production Research*, 2019, 57, 7567-7585. DOI: 10.1080/00207543.2019.1587189.
- [B69] AN, Q.; YAN, H.; WU, J.; LIANG, L. Internal resource waste and centralization degree in two-stage systems: An efficiency analysis. *Omega*, 2016, 61, 89-99. DOI: 10.1016/j.omega.2015.07.009.
- [B70] HRABEC, D.; KÚDELA, J.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; POPELA, P. Circular economy implementation in waste management network design problem: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 2020, 28, 1441-1458. DOI: 10.1007/s10100-019-00626-z.
- [B71] BARBOSA-PÓVOA, A. P.; SILVA, C.; CARVALHO, A. Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. *European Journal of Operational Research*, 2018, 268, 399-431. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.10.036.
- [B72] KAZEMI, N.; MODAK, N. M.; GOVINDAN, K. A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis. *International Journal of Production Research*, 2019, 57, 4937-4960. DOI: 10.1080/00207543.2018.1471244.
- [B73] RABBOUCH, B.; RABBOUCH, H.; SAÂDAOUI, F.; MRAIHI, R. Foundations of combinatorial optimization, heuristics, and metaheuristics. *Comprehensive Metaheuristics*, 2023, 407-438. DOI: 10.1016/B978-0-323-91781-0.00022-3.
- [B74] ZHOU, L.; ZHEN, L.; BALDACCI, R.; BOSCHETTI, M.; DAI, Y.; LIM, A. A Heuristic Algorithm for solving a large-scale real-world territory design problem. *Omega*, 2021, 103, 102442. DOI: 10.1016/j.omega.2021.102442.
- [B75] BURRE, J.; BONGARTZ, D.; MITSOS, A. Comparison of MINLP formulations for global superstructure optimization. *Optimization and Engineering*, 2023, 24, 801-830. DOI: 10.1007/s11081-021-09707-y.
- [B76] CARAMIA, M.; GIORDANI, S. Location of differentiated waste collection centers with user cooperation: a bilevel optimization approach. *Optimization Letters*, 2020, 14, 85-99. DOI: 10.1007/s11590-019-01491-0.
- [B77] FENG, J. Application of a Bilevel Programming Model in Disposal Site Selection for Hazardous Waste. *Environmental Engineering Science*, 2021, 38, 789-801. DOI: 10.1089/ees.2020.0375.
- [B78] ARGOUBI, M.; JAMMELI, H.; MASRI, H. The intellectual structure of the waste management field. *Annals of Operations Research*, 2020, 294, 655-676. DOI: 10.1007/s10479-020-03570-3.
- [B79] KARIMI-MAMAGHAN, M.; MOHAMMADI, M.; MEYER, P.; KARIMI-MAMAGHAN, A. M.; TALBI, E. G. Machine learning at the service of metaheuristics for solving combinatorial optimization problems: A state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 2022, 296, 393-422. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.04.032.

- [B80] MORABIT, M.; DESAULNIERS, G.; LODI, A. Machine-learning-based arc selection for constrained shortest path problems in column generation. *INFORMS Journal on Optimization*, 2022, 5, 191-210. DOI: 10.1287/ijoo.2022.0082.
- [B81] MUSUMECI, F.; ROTTONDI, C.; NAG, A.; MACALUSO, I.; ZIBAR, D.; RUFFINI, M.; TORNATORE, M. An Overview on Application of Machine Learning Techniques in Optical Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21, 1383-1408. DOI: 10.1109/comst.2018.2880039.
- [B82] ORKUN BAYCIK, N. Machine Learning Based Approaches to Solve the Maximum Flow Network Interdiction Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 167, 107873. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107873.
- [B83] GAMBELLA, C.; GHADDAR, B.; NAOUM-SAWAYA, J. Optimization problems for machine learning: A survey. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290, 807-828. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.08.045.
- [B84] LJUBIĆ, I.; MOUACI, A.; PERROT, N.; GOURDIN, É. Benders decomposition for a node-capacitated Virtual Network Function placement and routing problem. *Computers & Operations Research*, 2021, 130, 105227. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105227. .
- [B85] LUAN, X.; DE SCHUTTER, B., MENG, L.; CORMAN, F. Decomposition and distributed optimization of real-time traffic management for large-scale railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 141, 72-97. DOI: 10.1016/j.trb.2020.09.004.
- [B86] MESELHI, M.; SARKER, R.; ESSAM, D.; ELSAYED, S. A decomposition approach for large-scale non-separable optimization problems. *Applied Soft Computing*, 2022, 115, 108168. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.108168.
- [B87] LAM, H. L.; VARBANOV, P.; KLEMEŠ, J. J. Optimisation of Regional Energy Supply Chains Utilising Renewables: P-Graph Approach. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, 26, 1003-1008. DOI: 10.1016/S1570-7946(09)70167-1.
- [B88] LAM, H. L.; KLEMEŠ, J. J.; KRAVANJA, Z. Model-size reduction techniques for large-scale biomass production and supply networks. *Energy*, 2011, 36, 4599-4608. DOI: 10.1016/j.energy.2011.03.036.
- [B89] MARTIN, N.; FRASCA, P.; CANUDAS-DE-WIT, C. Large-Scale Network Reduction Towards Scale-Free Structure. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2019, 6, 711-723. DOI: 10.1109/TNSE.2018.2871348.
- [B90] DE BONA, A. A.; DE OLIVEIRA ROSA, M.; ONO FONSECA, K. V.; LÜDERS, R. A reduced model for complex network analysis of public transportation systems. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 567, 125715. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125715.
- [B91] ZENG, Y.; SONG, C.; GE, T.; ZHANG, Y. Reduction of large-scale graphs: Effective edge shedding at a controllable ratio under resource constraints. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 240, 108126. DOI: 10.1016/j.knosys.2022.108126.

- [B92] GUIMARÃES, L. R.; DE SOUSA, J. P.; DE ATHAYDE PRATA B. Variable fixing heuristics for the capacitated multicommodity network flow problem with multiple transport lines, a heterogeneous fleet and time windows. *Transportation Letters*, 2022, 14, 84-93. DOI: 10.1080/19427867.2020.1815143.
- [B93] ASSEF, F. M.; STEINER, M. T. A.; DE LIMA, E. P. A review of clustering techniques for waste management. *Heliyon*, 2022, 8, e08784. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e08784.
- [B94] CARAMIA, M.; PIZZARIE. Clustering, location, and allocation in two stage supply chain for waste management: A fractional programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169, 108297. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108297.
- [B95] WEI, Z.; LIANG, C.; TANG, H. A Cross-Regional Scheduling Strategy of Waste Collection and Transportation Based on an Improved Hierarchical Agglomerative Clustering Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022, 1-17. DOI: 10.1155/2022/7412611.
- [B96] JAMMELI, H.; ARGOUBI, M.; MASRI, H. A Bi-objective stochastic programming model for the household waste collection and transportation problem: case of the city of Sousse. *Operational Research*, 2021, 21, 1613-1639. DOI: 10.1007/s12351-019-00538-5.
- [B97] KIR, S.; CÖMERT, S. E.; YENER, F.; YAZGAN, H. R.; CANDAN, G. Hazardous Waste Recycling: End of Life Tires Case. *Acta Physica Polonica A*, 2019, 135, 681-683. DOI: 10.12693/APhysPolA.135.681.
- [B98] MATUŠINEC, J.; HRABEC, D.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; REDUTSKIY, Y. Cooking oils and fat waste collection infrastructure planning: a regional-level outline. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2022, 24, 109-123. DOI: 10.1007/s10098-021-02087-y.
- [B99] CENIA, 2023. The Czech Environment Information Agency. <https://www.cenia.cz/czech-environmental-information-agency/organisation-profile/>.
- [B100] Vyhláška č. 8/2021 Sb. o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů) ze dne 12. 1. 2021. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2021, částka 5 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-8>.
- [B101] Vyhláška č. 273/2021 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady. Cit. 20.5.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273>.
- [B102] BENNAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28, 29-43. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- [B103] GREGOR, J.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M. Transportation cost as an integral part of supply chain optimization in the field of waste management. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 56, 1927-1932. DOI: 10.3303/CET1756322.
- [B104] WILLIAMS, H. P. *Logic and integer programming*. Springer, 2009.



- [B105] GIUGLIANO, M.; GROSSO, M.; RIGAMONTI, L. Energy recovery from municipal waste: a case study for a middle-sized Italian district. *Waste Management*, 218, 28, 39-50. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.12.018.
- [B106] FERDAN, T.; ŠOMPLÁK, R.; ZAVÍRALOVÁ, L.; PAVLAS, M.; FRÝBA, L. A waste-to-energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89, 1127-1136. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005.
- [B107] Kurzy.cz, 2022b. EU carbon permits price - EU Emissions Trading System. <https://eng.kurzy.cz/komodity/emisni-povolenky/>
- [B108] ERNST & YOUNG. Podklady pro oblast podpory odpadového a oběhového hospodářství OPŽP 2021 – 2027, Nebezpečné odpady (In Czech). 2020. [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove\\_obehove\\_hospodarstvi/\\$FILE/OODP-6\\_Nebezpecne\\_odpady-20200529.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_obehove_hospodarstvi/$FILE/OODP-6_Nebezpecne_odpady-20200529.pdf).
- [B109] HENNIG, C.; MEILA, M.; MURTAGH, F.; ROCCI, R. *Handbook of cluster analysis*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.