

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

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

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.....	7
1.1	ČINNOSTI NA ÚPI A VÝZVY V OBLASTI OPTIMALIZACE OH	8
2	LITERÁRNÍ REŠERŠE A ZAMĚŘENÍ PRÁCE	10
3	SPRÁVA DAT ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.....	12
3.1	ANALÝZA A REKONSTRUKCE DAT.....	13
3.2	ANALÝZA SLOŽENÍ TOKU ODPADU	14
3.3	VYHODNOCENÍ APLIKACE NA PŘÍPADOVOU STUDII	15
3.4	SHRNUTÍ A DISKUZE	17
4	PODPORA PLÁNOVÁNÍ V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ.....	18
4.1	OBECNÝ MODEL	18
4.2	OPTIMALIZACE MÍRY SEPARACE.....	21
4.3	ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU.....	23
4.4	INFRASTRUKTURA PRO DOTŘÍDĚNÍ PLASTŮ	26
4.5	VYHODNOCENÍ DOSTATEČNOSTI KAPACIT.....	29
4.6	SHRNUTÍ A DISKUZE.....	30
5	VÝPOČTOVÁ NÁROČNOST	31
5.1	SHLUKOVÁNÍ – VARIABILNÍ DETAIL	31
5.2	ODEBÍRÁNÍ HRAN.....	33
5.3	SHRNUTÍ A DISKUZE.....	35
6	ZÁVĚR.....	36
	REFERENCE.....	37

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Návaznosti projektů řešených v rámci aktivit ÚPI na výstupy a jejich aplikace.	8
Obr. 3.1: Obecný rámec přístupu ke správě a vyhodnocení dat OH.....	12
Obr. 3.2: Analýza transportu kalů a identifikace hmotnostních nesouladů včetně oprav zjevných chyb v pre-procesingu.	15
Obr. 3.3: Grafické znázornění výpočtu sušiny v kalech pro evidenty s konečným zpracováním.	16
Obr. 4.1: Schéma uvažovaného systému pro vyhodnocení optimální míry separace a zpracovatelskou infrastrukturu.....	22
Obr. 4.2: Výsledná mapa toků papíru a rozmístění příslušných třídících linek.....	23
Obr. 4.3: Klíčové prvky modelovaného systému při návrhu infrastruktury ZEVO.	24
Obr. 4.4: Výsledná infrastruktura ZEVO a odpovídající alokace odpadu v prvním scénáři.	25
Obr. 4.5: Struktura zpracování plastového odpadu po integraci automatizovaných linek.....	26
Obr. 4.6: Navrhnutá infrastruktura pro zpracování plastů včetně toků odpadu.	28
Obr. 5.1: Výsledné rozdělení obcí do shluků před a po zohlednění produkce odpadu.....	33
Obr. 5.2: Schéma přístupu k řešení rozsáhlých úloh pomocí odstranění hran.....	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1: Výsledky redukce modelu při odstranění hran na základě klasifikačního modelu.....	34
---	----

SEZNAM ZKRATEK

CEP	Balíček oběhového hospodářství (Circular economy package)
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].

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.

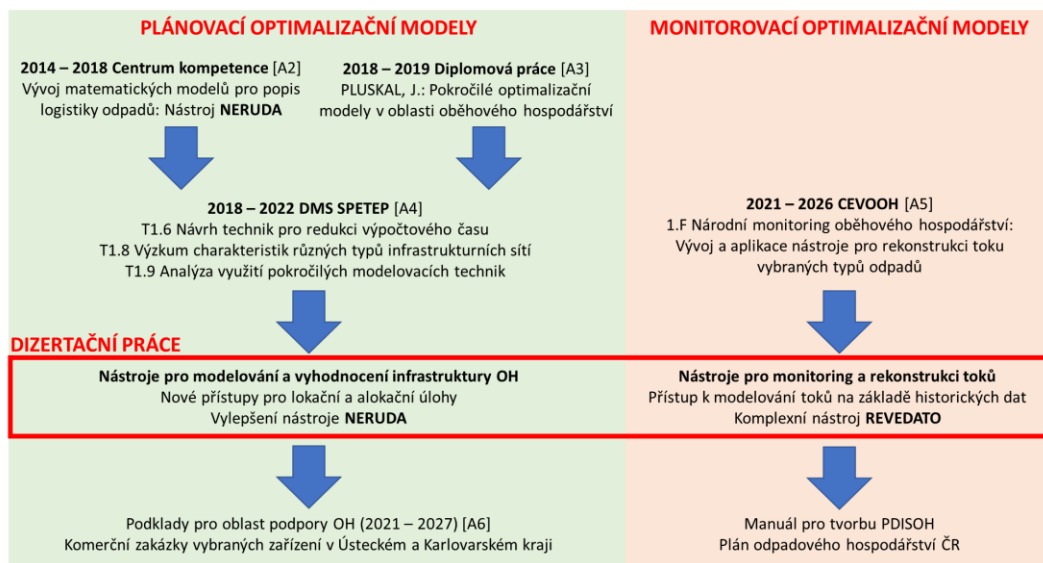
Většina populace, alespoň v zemích s vyspělým systémem nakládání s odpady, podporuje základní myšlenku podpory ekologie a konceptu cirkulární ekonomiky, přičemž třídění a recyklace odpadu je vnímána jako klíčový krok směrem k ochraně životního prostředí. Nicméně reálné provozy potvrzují, že při zpracování odpadu vznikají reziduální toky materiálu, které není možné materiálově zpracovat. Typickým příkladem je plastový odpad, u kterého je v průměru využíváno pouze 60 % z vyříděného 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. Následující Obr. 1.1 popisuje časovou osu jednotlivých projektů s návazností na odpovídající nástroje.



Obr. 1.1: Návaznosti projektů řešených v rámci aktivit ÚPI na výstupy a jejich aplikace.

Matematické modely pro řešení logistiky odpadu byly na ÚPI řešeny již v rámci projektu „Centrum kompetence pro energetické využití odpadu“ [A1]. 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) [A2], kde některé aktivity byly navázané 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 [A3]. 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 [A4].

Cílem aktuálně běžícího projektu CEVOOH [A5] 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.

II. Analýza toku a složení odpadu

Analýza toku odpadu (známá pod označením „Material Flow Analysis“) je často využívaná 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. 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.

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. 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.

VII. Výpočetní náročnost

Podmínky definované v předchozích bodech mohou poskytnout větší vhled 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. 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 činnosti 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.

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. Další kapitoly jsou následně věnovány správě dat z OH, jejich rekonstrukci a analýzám. 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.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE A ZAMĚŘENÍ PRÁCE

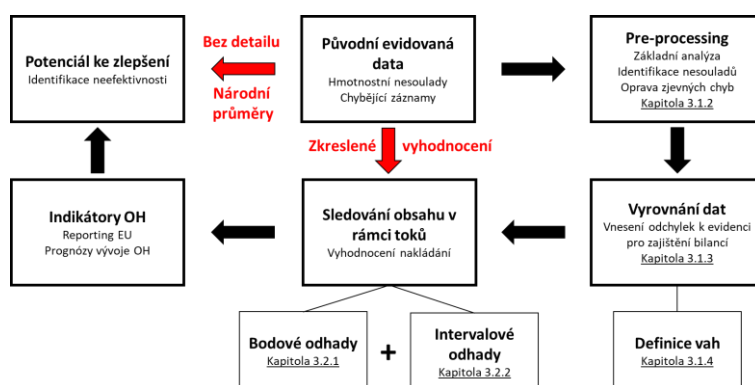
Literární rešerše představuje základní kámen pro vývoj nových modelů, které mohou být následně implementovány do příslušných nástrojů. Cílem je získat podpůrný materiál pro vytyčené cíle plynoucí z reálných požadavků na modelovaný systém během aktivit na ÚPI. Získané poznatky mohou pomoci při správném 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. 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 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 [B17]) 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 smíchání odpadu od různých producentů, který pak není možné v daném místě jednoznačně identifikovat. Tato problematika 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 kombinacemi 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.

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. Konkrétně se jedná převzatou publikaci autora této dizertační práce [A7], kde lze dohledat případné detaily.

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. Princip opravy těchto chyb je založen na systematické analýze všech zaznamenaných toků, které jsou mezi sebou porovnávány. Pro provedení korekce musí mít oba toky stejnou množstevní chybu, ale opačného významu a oba toky musí spojovat stejný subjekt. Pokud existuje více než jedna možná korekce, chyba je ponechána pro vyrovnání dat. Výhodou této opravy je, že tyto korekce nijak nezasahují do bilance v uzlech a jsou pouze vhodným způsobem přeměšovány 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 by tyto chyby měla korektně opravit.

Oprava chyb v pre-procesingu 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. 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 vyplývajících přímo z dat. 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.

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.

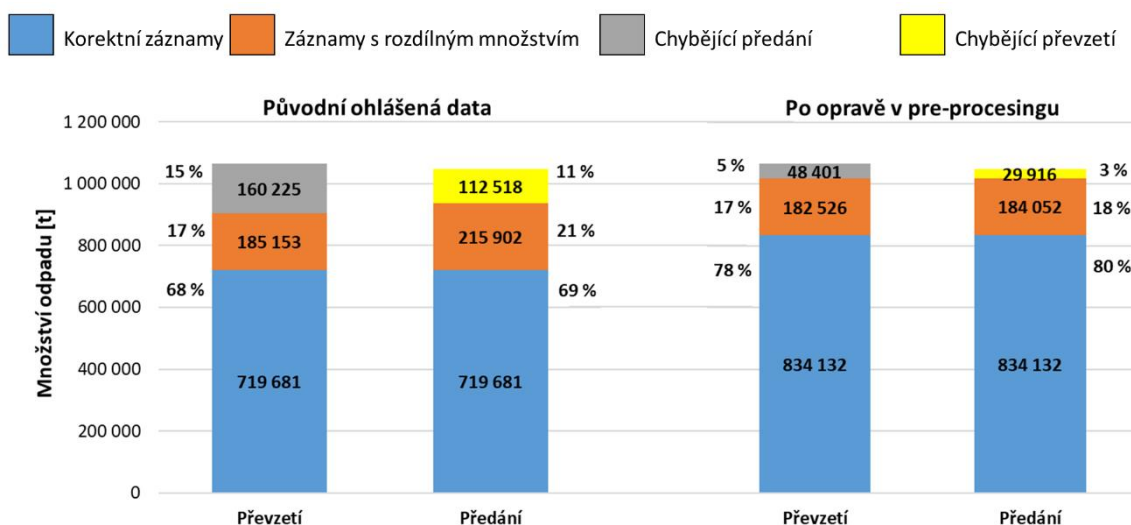
Díky rekonstrukci dat a zajištění hmotnostních bilancí na všech úrovních systému je možné přístup průměrování převést na nižší úroveň jednotlivých mikroregionů či subjektů a tím poskytnout odhad na základě toků odpadu, které jsou navázané přímo na daný uzel. Jedná se o stejný přístup jako doposud s tím 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. Úloha je založena na problému toku v síti, kde množství zvodnělého kalu v systému je vždy známo díky vyrovnání dat a zajištění hmotnostních bilancí.

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. Minimalizací nebo maximalizací podílu sušiny ve vybraném uzlu tak lze získat příslušné limity.

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. Díky výzkumné spolupráci s agenturou CENIA [B17] v rámci projektu CEVOOH [A5] byla pro vývoj poskytnuta ohlášená data. Detail poskytnutých dat odpovídá nejnižší 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).

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. Výsledná analýza je graficky znázorněna na Obr. 3.2, kde záznamy splňující principy evidence jsou znázorněny modrou barvou, Hodnoty jsou prezentovány jak z pohledu původní databáze bez úprav, tak i následně po korekcích popsanych v rámci pre-procesingu.

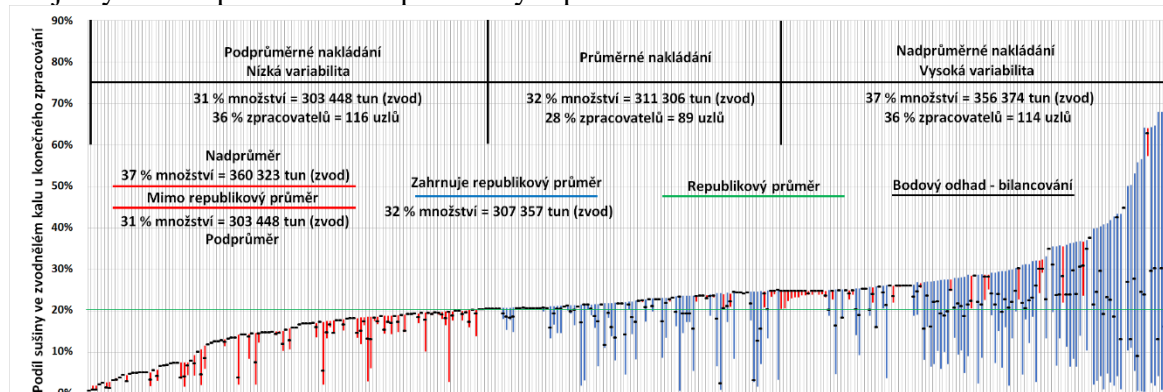


Obr. 3.2: Analýza transportu kalů a identifikace hmotnostních nesouladů včetně oprav zjevných chyb v pre-procesingu.

Z analýzy transportu odpadu je patrné, že u více než 30 % z celkového množství přepravovaného odpadu dochází ke chybným hlášením. Navíc jednu třetinu těchto chyb představuje případ, kdy existuje pouze jeden záznam a vzhledem k rozdílům 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. 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.

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. Variabilita podílu sušiny v kalech v místě produkce je však 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. 3.3, kde jsou zobrazeny jednotlivé subjekty včetně porovnání s republikovým průměrem.



Obr. 3.3: 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. 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 patřičných 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. Vyvinutý přístup umožňuje přesnější posouzení situace a identifikaci konkrétních oblastí, kde značné množství kvalitního odpadu může zůstat nevyužité. 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. 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 aparátem jsou tyto informace ztraceny.

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 uvedeny nové přístupy matematického programování v oblasti plánování zpracovatelské infrastruktury včetně 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 [B20] 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 0 je nutné matematický model koncipovat jako vícekritériální se zohledněním neurčitosti. Z pohledu plánování zpracovatelské infrastruktury lze využít vícestupňové 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“) [B21], 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 _{2eq} /kg]
$E_{i,k}^P$	vyprodukované emise během provozu a postavení scénáře k v uzlu i , [CO _{2eq}]
E_a^T	vyprodukované emise během dopravy odpadu po hraně a , [CO _{2eq} /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 _{2eq}]
w^{FIN}	váha pro normalizaci ekonomického kritéria v účelové funkci, [1/CZK]
λ	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 _{2eq}]
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 λ , 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.

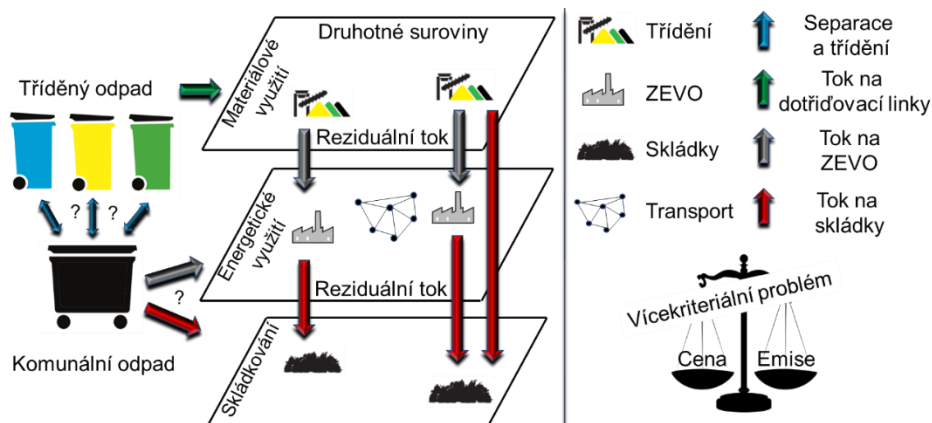
$$x_{a,o,s} \geq 0, \quad \forall a \in A, \forall o \in O, \forall s \in S. \quad (4.9)$$

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

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. 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.

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 vhledem 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.

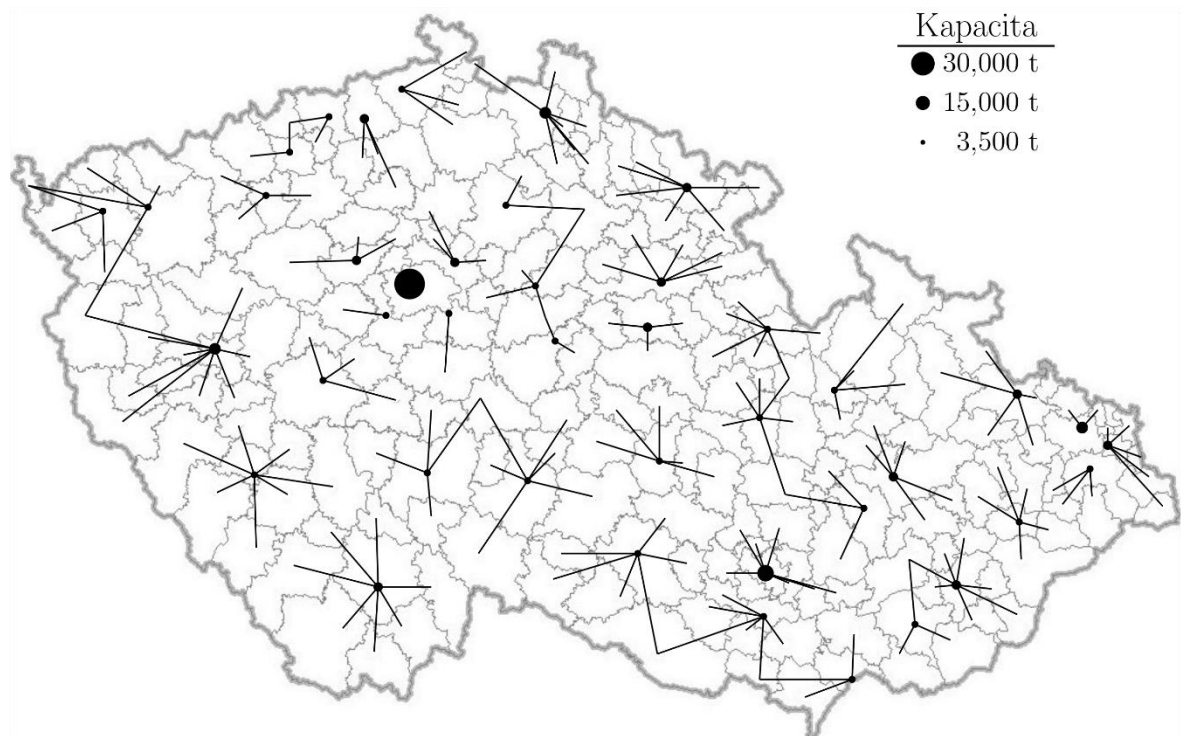


Obr. 4.1: Schéma uvažovaného systému pro vyhodnocení optimální míry separace a zpracovatelskou infrastrukturu.

Uvažovaný systém představuje několika stupňovou strukturu, kde jednotlivé úrovně jsou vzájemně propojeny vznikem reziduálních odpadů po každém procesu. Finálním zařízením je skládka, přičemž předpokládaným cílem je minimalizace skládkovaného odpadu. 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 odpovídající 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. Optimalizační model tak musí navrhnout vhodný mix zařízení s odpovídající kapacitou a lokalizací v rámci řešeného území.

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 [A6].

Prvním odpadovým proudem je plast, jehož separace je výhodná zejména na východu ČR a také v oblastech s velkou produkcí odpadu. Průměrná míra separace na území ČR je 52 %. 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 vytržít a míra separace nebude nulová v žádném regionu. Další analyzovanou frakcí je papír. Výsledná mapa s toky odpadu a rozmístěním dotřídovacích linek je uvedena na Obr. 4.2. 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.



Obr. 4.2: Výsledná mapa toků papíru a rozmístění příslušných třídících linek.

V ČR existuje více než 90 dotříd'ovacích 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 dotříd'ovacích 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 dotříd'ovacích linek. Zde dochází k 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. Celková míra separace plastů dosahuje 52 % z nichž více jak polovina je nevhodná pro materiálové využití. 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.

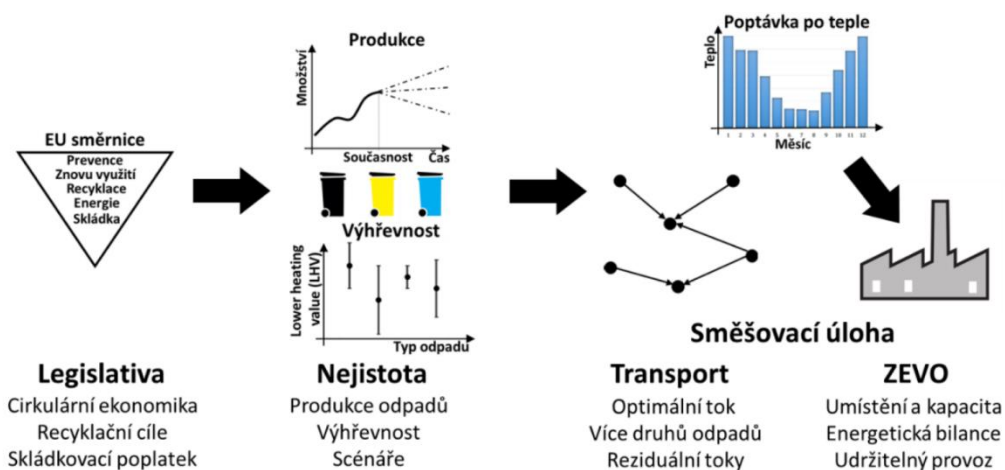
4.3 Energetické využití odpadu

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 [B22].

Moderní ZEVO využívají odpad pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny (kogeneraci), přičemž jejich následný prodej může tvořit až 50 % příjmů zařízení [B23]. 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 [B16].

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, 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. 4.3, kde s ohledem na hierarchii nakládání a nejistotu produkce složení odpadu je vytvořen aparát pro návrh optimální infrastruktury energetického využití.



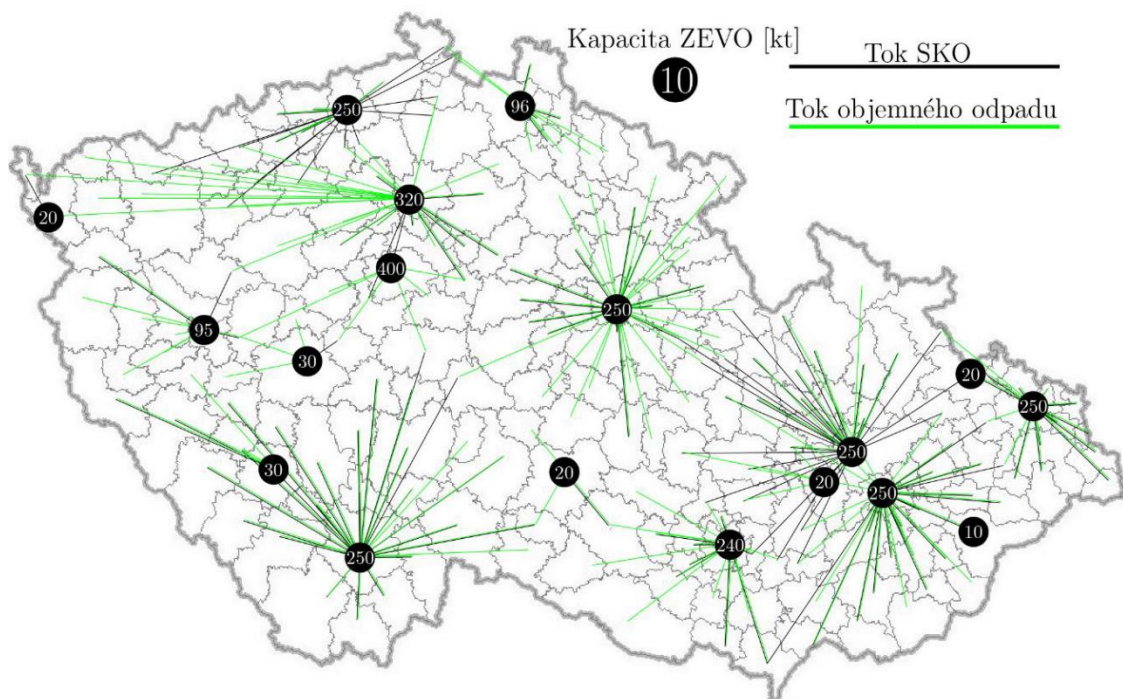
Obr. 4.3: Klíčové prvky modelovaného systému při návrhu infrastruktury ZEVO.

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.

Přínos modelu je ověřen na motivační případové studii pro ČR s ohledem na více druhů odpadu vhodných pro energetické využití. Konkrétně se jedná o SKO, objemný odpad (ObjO) a výměty 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 [B15]. Stejným způsobem se odhaduje výhřevnost SKO pro každou oblast podle jejího složení. Rezidua z recyklace jsou určena recyklační účinností v závislosti na míře separace. 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. Dále jsou vytvořeny scénáře s dalším omezením pro cementárny, které mohou zpracovat pouze část reziduí. 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.

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. 4.4 je znázorněno rozmístění kapacit a oblasti svozu odpadu pro základní scénář.

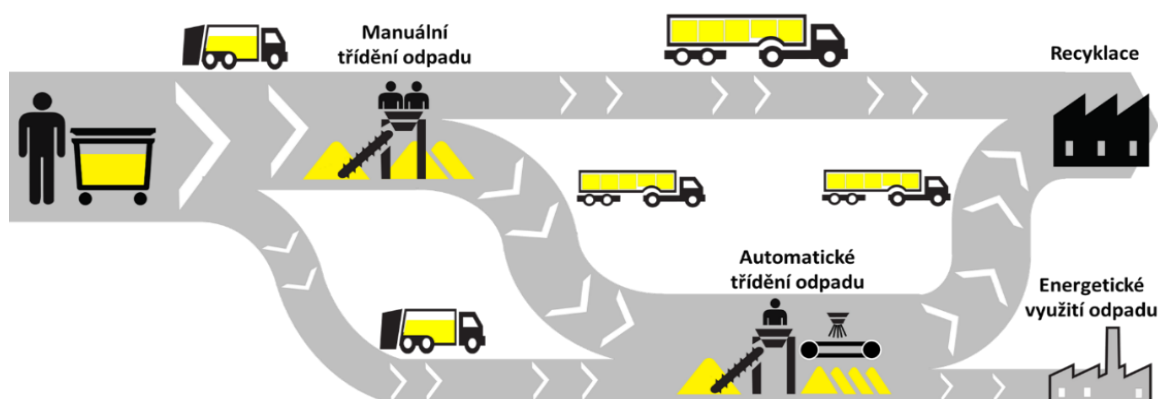


Obr. 4.4: Výsledná infrastruktura ZEVO a odpovídající alokace odpadu v prvním scénáři.

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. 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 dotřídňovacími 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 skrz nízkou sypanou hmotnost 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 1.



Obr. 4.5: Struktura zpracování plastového odpadu po integraci automatizovaných linek.

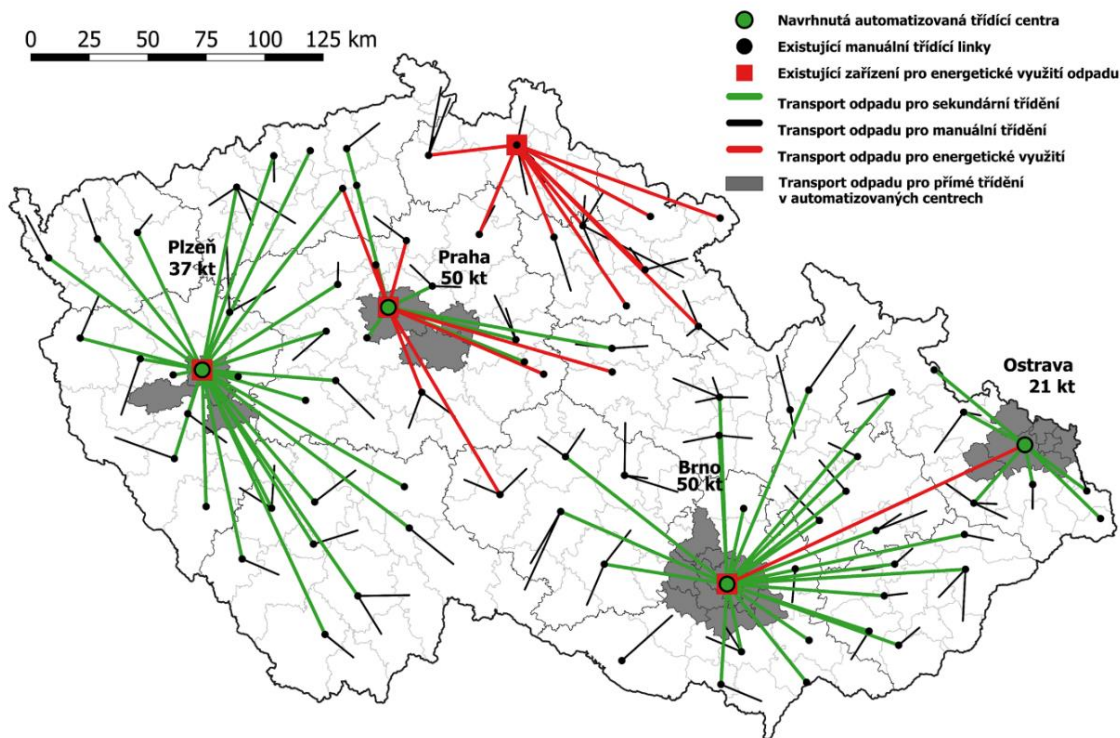
Základní myšlenka systému je postavená na maximálním využití současné infrastruktury ručních třídících linek. Ty mohou být doplněny o vhodně lokalizovaná a nadimenzovaná moderní automatická centra, která pomohou s dotříděním těžko rozpoznatelné části odpadu. V rámci ručního třídění mohou být separovány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

Řešená případová studie řeší představený optimalizační problém pro ČR v detailu ORP. 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 z důvodu snížení výpočtové náročnosti a výběr je realizován na základě výhodné pozice v rámci ČR a počtu obyvatel. 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.

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_{2eq} ve srovnání pouze s energetickým zpracováním. Jako optimální řešení je vybrán případ, kdy hodnota $\lambda = 0,78$. 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 CO_{2eq} při jednotkových nákladech 79,4 EUR za tunu CO_{2eq}. Aktuální průměrná cena emisních povolenek v roce 2022 podporuje volbu tohoto scénáře, jejíž hodnota se pohybuje okolo 80 EUR/t CO_{2eq} [B24]. 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 navrhují 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 třídících center jsou zobrazeny na Obr. 4.6.



Obr. 4.6: 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 navrhována 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.

Nejvhodnější komodity plastu jsou ve většině případů tříděny ručně, což odpovídá jejich následnému prodeji za cenu převyšující provozní náklady. PET láhve představují žádoucí 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 chování budoucí chování. 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.

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. 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 [B15]. Současně je preferováno zpracování odpadu v blízkosti produkce i přes nepreferovaný typ zpracování.

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. V následující části jsou představeny pouze hlavní závěry vyplývající z výsledků optimalizace. Konkrétní detaily týkající se jednotlivých zařízení jsou uvedeny v dizertační práci. Klíčové body jsou následující:

- 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.

- Převážná vzdálenost NO v současné době činí u 15 % odpadu více než 100 km, což neodpovídá regionální soběstačnosti. Z vyhodnocení vyplývá, že optimální zvýšení jednotlivých kapacit téměř odstraňuje přepravu přes 100 km. Bez nových zařízení však nelze dosáhnout soběstačnosti v definované vzdálenosti.

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 schválená 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. 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 výpočetového 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.

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 vyústil 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)).

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

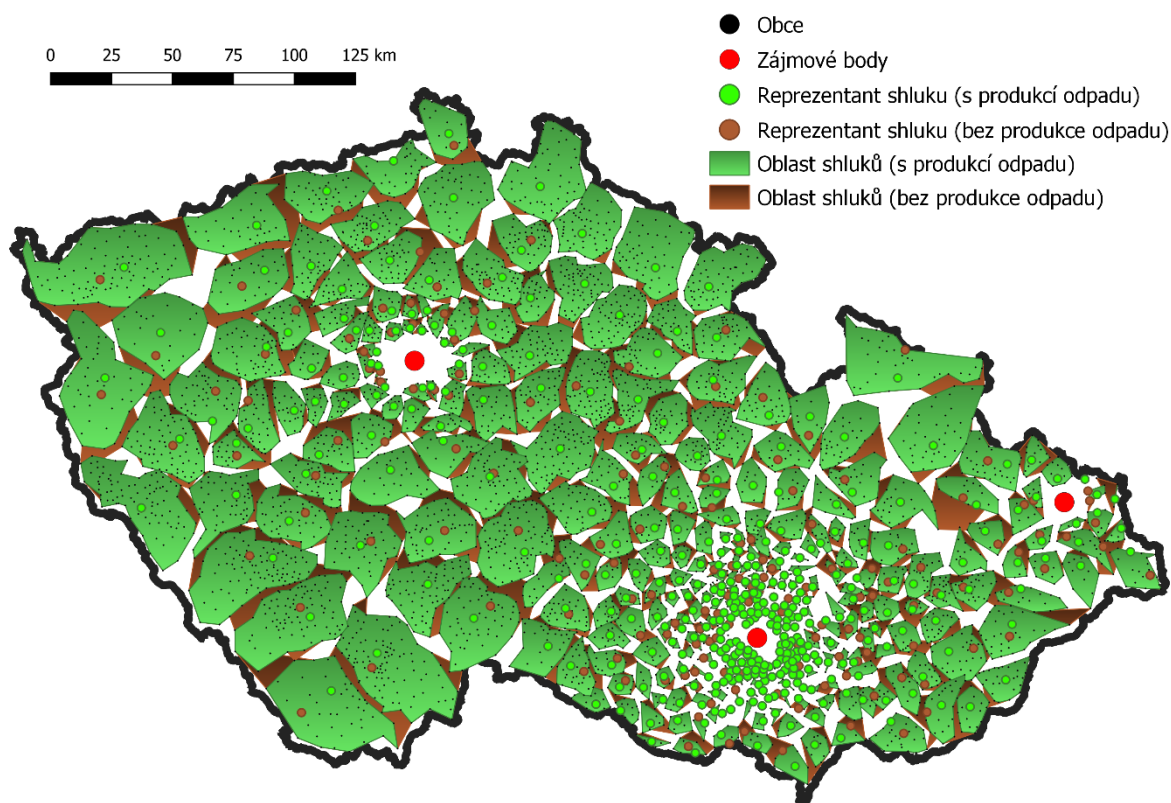
Zmíněná transformace pro každý uzel v 2D prostoru je dána rovnicí (5.2), kde index R označuje bod zájmu (referenční bod).

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

Tato transformace definuje nové souřadnice pro každý uzel, které jsou posunuty podél přímků 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. Na transformované souřadnice uzlů lze následně aplikovat shlukovou analýzu. Mezi nejčastěji využívané algoritmy shlukové analýzy je patří k-means [B25]. Provedenou transformaci lze pak dále vhodně modifikovat pomocí dalších rozšíření zohledňující další aspekty řešené úlohy (např. volba detailu, více referenčních bodů). Konkrétní detaily je možné dohledat v dizertační práci.

Následující Obr. 5.1 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.

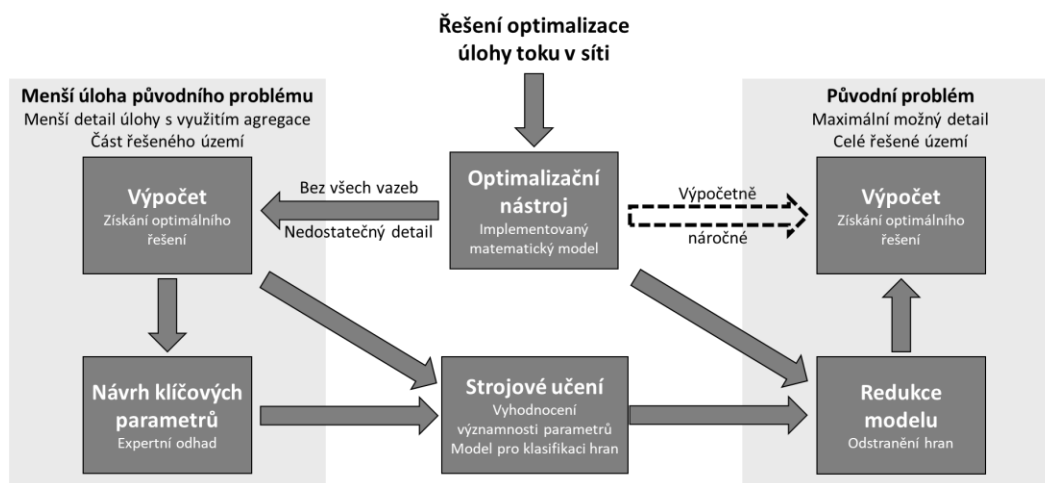


Obr. 5.1: Výsledné rozdělení obcí do shluků před a po zohlednění produkce odpadu.

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 [A11].

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. 5.2.



Obr. 5.2: 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 verifikaci přístupu byl využit model prezentovaný v kapitole 4.3. 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. Celkově je však značně snížena výpočtová náročnost modelu na pouhou jednu desetinu, jelikož hlavním kritériem pro náročnost modelu je počet celočíselných proměnných. Klasifikační model založený na strojovém učení ohodnotil většinu hran v této úloze 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. 5.1.

Tab. 5.1: 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.

Z výsledků vyplývá, že velikost modelu může být snížena na pouhých 15 % beze 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 vzdálenosti, 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), jenž 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.

REFERENCE

A – Publikace autora a projekty na ÚPI

- [A1] Centrum kompetence pro energetické využití odpadu. TE02000236. TAČR. Doba řešení: 2014-2018.
- [A2] SPETEP. Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008413. Doba řešení: 2018-2022.
- [A3] 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>.
- [A4] 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/>
- [A5] CEVOOH. Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost. SS02030008. TAČR. Doba řešení. 1.1.2021 – 31.12.2026
- [A6] 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.
- [A7] 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.
- [A8] 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. XX
- [A9] 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. XX
- [A10] 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.
- [A11] 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] PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; NEVRLÝ, V.; ZAVÍRALOVÁ, L.; KÚDELA, 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.
- [B16] 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.
- [B17] CENIA, 2023. The Czech Environment Information Agency. <https://www.cenia.cz/czech-environmental-information-agency/organisation-profile/>.
- [B18] 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>.
- [B19] Vyhláška č. 273/2021 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady. Cit. 20.5.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273>.
- [B20] 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.
- [B21] WILLIAMS, H. P. *Logic and integer programming*. Springer, 2009.
- [B22] 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.
- [B23] 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.
- [B24] Kurzy.cz, 2022b. EU carbon permits price - EU Emissions Trading System. <https://eng.kurzy.cz/komodity/emisni-povolenky/>
- [B25] HENNIG, C.; MEILA, M.; MURTAGH, F.; ROCCI, R. *Handbook of cluster analysis*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.