



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**Ing. Veronika Smejkalová**

**POKROČILÉ PROGNOSTICKÉ MODELY  
V OBLASTI ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ**

ADVANCED PROGNOSTIC MODELS IN WASTE MANAGEMENT

**TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS SUMMARY

**OBOR KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ**

DESIGN AND PROCESS ENGINEERING SPECIALIZATION

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.**

**BRNO 2022**



## **ABSTRAKT**

Vydaný balíček oběhového hospodářství definuje opatření pro přechod od lineárního modelu hospodářství k oběhovému. Konkrétní cíle jsou implementovány do legislativy členských států EU. Prognózy produkce odpadů představují stěžejní informaci pro modifikaci stávající infrastruktury odpadového hospodářství tak, aby byl možný plynulý přechod k oběhovému hospodářství. V této práci je představen univerzální přístup k prognózování produkce odpadů pomocí optimalizačních modelů zahrnující přípravu dat, vlastní výpočet a zpracování do vhodné podoby pro konečné uživatele. Prognóza klade důraz na přípravné fáze a očištění vstupních dat od anomálií. Přístup je založen na modelování trendu v historických datech s následnou korekcí pro obnovení vazeb územního členění a frakcí odpadů. Nejistota prognózy je popsána pásy spolehlivosti konstruovanými pomocí bootstrapového přístupu. Dopad konkrétních opatření na podobu odpadového hospodářství je možné modelovat pomocí projekce. Předkládaná metodika je zpracována obecně a je vhodným základem pro strategické plánování na lokální, národní i nadnárodní úrovni.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Produkce odpadu, TiramisO, prognóza, analýza trendu, vyrovnávání dat

## **ABSTRACT**

The issued Circular economy package defines the measures for the transition from a linear economy to a circular economy. The specific targets are implemented in the legislation of the EU Member States. Waste production forecasts are key information for modifying existing infrastructure to allow a smooth transition to a circular economy. This work presents a universal approach to waste production forecasting using optimization models including data preparation, calculation and processing into a suitable form for users. The forecast emphasizes the preparatory phases and the clean-up of input data from anomalies. The modeling principle is based on trend modeling in historical data with subsequent correction to restore the links between territorial divisions and waste fractions. Forecast uncertainty is described by confidence intervals constructed using a bootstrap approach. The impact of specific measures on the form of waste management can be modeled using projection. The presented methodology is developed in general and is a suitable basis for strategic planning at the local, national and supranational levels.

## **KEYWORDS**

Waste generation, TiramisO, forecast, trend analysis, data reconciliation

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr.h.c. za poskytnutí kvalitních podmínek pro studium. Svému školiteli doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. děkuji za vedení závěrečné práce. Dále děkuji školiteli specialistovi Ing. Radovanu Šomplákovi, Ph.D. za odborné vedení, podnětné rady a trpělivost, která mi byla věnována. Mé poděkování patří též Ing. Vlastimíru Nevrlému, Ph.D. a Ing. Jaroslavu Pluskalovi za spolupráci.

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.

## OBSAH

1	ÚVOD.....	8
1.1	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A ZASAZENÍ DO KONTEXTU ČINNOSTÍ NA ÚPI.....	11
2	PROGNÓZA PRODUKCE ODPADU – POPIS PŘÍSTUPU.....	15
2.1	PŘÍPRAVA DAT .....	15
2.1.1	Volba detailu územního členění .....	15
2.1.2	Volba frakce odpadu .....	16
2.1.3	Příprava vstupů, agregace dat .....	16
2.2	PRE-PROCESSING DAT.....	16
2.2.1	Vyhlazení dat .....	16
2.2.2	Odstranění odlehlých hodnot .....	17
2.2.3	Identifikace skoků v datech a změn trendu.....	17
2.3	PROCESSING.....	17
2.3.1	Prognózy vlivných faktorů.....	17
2.3.2	Aplikace zvolené metody.....	18
2.3.3	Vyrovňování dat.....	20
2.3.4	Konstrukce intervalů spolehlivosti .....	21
2.4	POST-PROCESSING.....	21
2.4.1	Modelování scénářů .....	21
2.4.2	Samoučící mechanismus.....	22
2.4.3	Prezentace výsledků.....	22
3	PŘÍPADOVÉ STUDIE PRO VYBRANÉ FRAKCE ODPADU .....	23
3.1	PROGNÓZA PRODUKCE NEBEZPEČNÉHO ODPADU.....	23
3.2	PROGNÓZA PRO OBLAST KOMUNÁLNÍHO ODPADU .....	24
3.2.1	Prognóza produkce a zpracování komunálního odpadu ve státech EU .....	24
3.2.2	Prognóza produkce komunálního odpadu v České republice.....	26
3.2.3	Prognóza produkce bio-odpadu v České republice.....	28
3.3	PROJEKCE PRODUKCE KOMUNÁLNÍHO ODPADU.....	30
4	MODEL Y VYUŽÍVAJÍCÍ PROGNÓZY PRODUKCE ODPADU ....	33
5	ZÁVĚR.....	37
	REFERENCE .....	39

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Cíle Balíčku oběhového hospodářství [A1].....	8
Obr. 2: Produkce a zpracování komunálního odpadu v EU, data 1995–2018, upraveno na základě [A1].....	9
Obr. 3: Materiálové využití KO, členské státy EU, rok 2020, zdroj dat: Eurostat [C7].....	10
Obr. 4: Skládkování KO, členské státy EU, rok 2020, zdroj dat: Eurostat [C7].....	10
Obr. 5: Znázornění vazeb činností na ÚPI.....	11
Obr. 6: Schematické znázornění postupu prognózování produkce odpadu.....	15
Obr. 7: Ukázka odklonu prognózy od trendu v datech, TiramisO [B6].....	20
Obr. 8: Prognóza produkce NO, úroveň ČR, výpočet: TiramisO [B6], zdroj dat: [C23]....	24
Obr. 9: Prognóza produkce a zpracování KO úroveň EU, upraveno na základě [A1].....	26
Obr. 10: Prognóza produkce SKO, úroveň ČR, zdroj: TiramisO [B6].....	28
Obr. 11: Prognóza produkce bio-odpadu, úroveň ČR, zdroj: TiramisO [B6].....	29
Obr. 12: Výsledky modelování scénáře, úroveň ČR, rok 2035.....	32
Obr. 13: Schéma systému nakládání s odpadem skládajícího se z ekonomické a environmentální složky, upraveno na základě [A12].....	34
Obr. 14: Vliv investice do prevence před vznikem odpadu na produkci, upraveno na základě [A12].....	34
Obr. 15: Prognóza materiálového využití KO v ČR a scénář pro splnění cílů EU, historická data 2010–2017, upraveno na základě [A13].....	35

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Odhad přesunu odpadu mezi SEP a SKO, [A9].....	27
Tab. 2: Nastavení modelovaných scénářů separace KO, úroveň ČR, rok 2035.....	31

## SEZNAM ZKRATEK

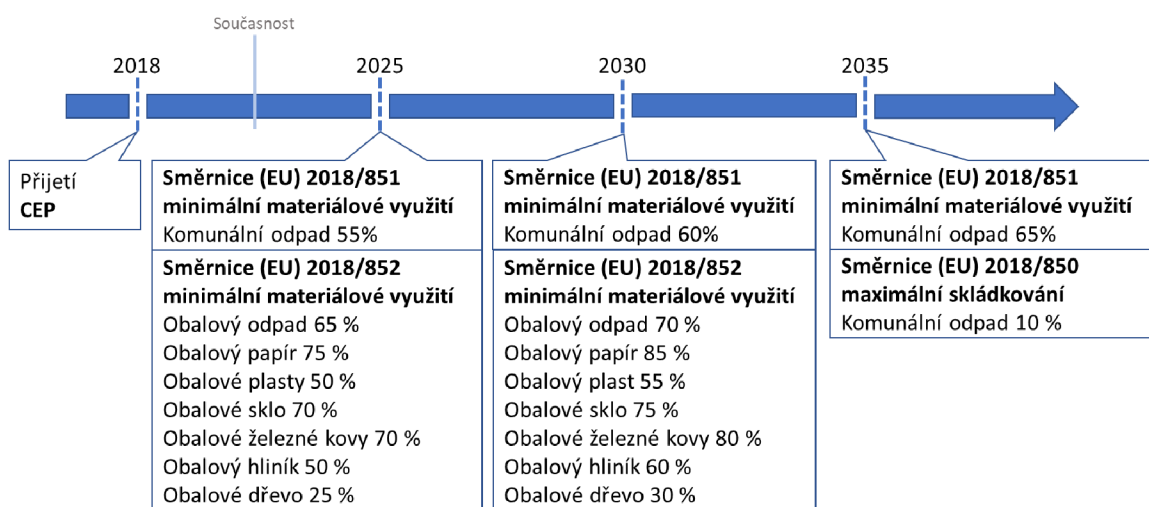
ARIMA	Autoregresní integrovaný klouzavý průměr (Autoregressive integrated moving average)
ARMA	Autoregresní klouzavý průměr (Autoregressive moving average)
BAU	Základní scénář (Business-as-usual scenario)
CEP	Balíček oběhového hospodářství (Circular economy package)
GIS	Geografický informační systém
ISOH	Informační systém odpadového hospodářství
Kat. č.	Katalogové číslo
KO	Komunální odpad
MS	Míra separace
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NO	Nebezpečný odpad
ObH	Oběhové hospodářství
OH	Odpadové hospodářství
ObjO	Objemný odpad
ORP	Obec s rozšířenou působností
PDISOH	Pracovní databáze ISOH
SARIMA	Sezonní autoregresní integrovaný klouzavý průměr (Seasonal autoregressive integrated moving average)
SEP	Separovaný odpad
SKO	Směsný komunální odpad
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadu

## SEZNAM SYMBOLŮ

$t$	Nezávisle proměnná označující rok produkce odpadu
$p_t$	Závisle proměnná udávající modelované množství produkovaného odpadu
$a, b, c$	Regresní koeficienty
$\bar{x}$	Průměr historických dat produkce odpadu
$c_i^{WASTE}$	Investice do prevence před vznikem odpadu v lokalitě $i$
$\bar{w}_i$	Odhad produkce odpadu v závislosti na $c_i^{WASTE}$
$w_{min}$	Minimální možná produkce sledované frakce odpadu
$w_{max}$	Maximální možná produkce sledované frakce odpadu

# 1 ÚVOD

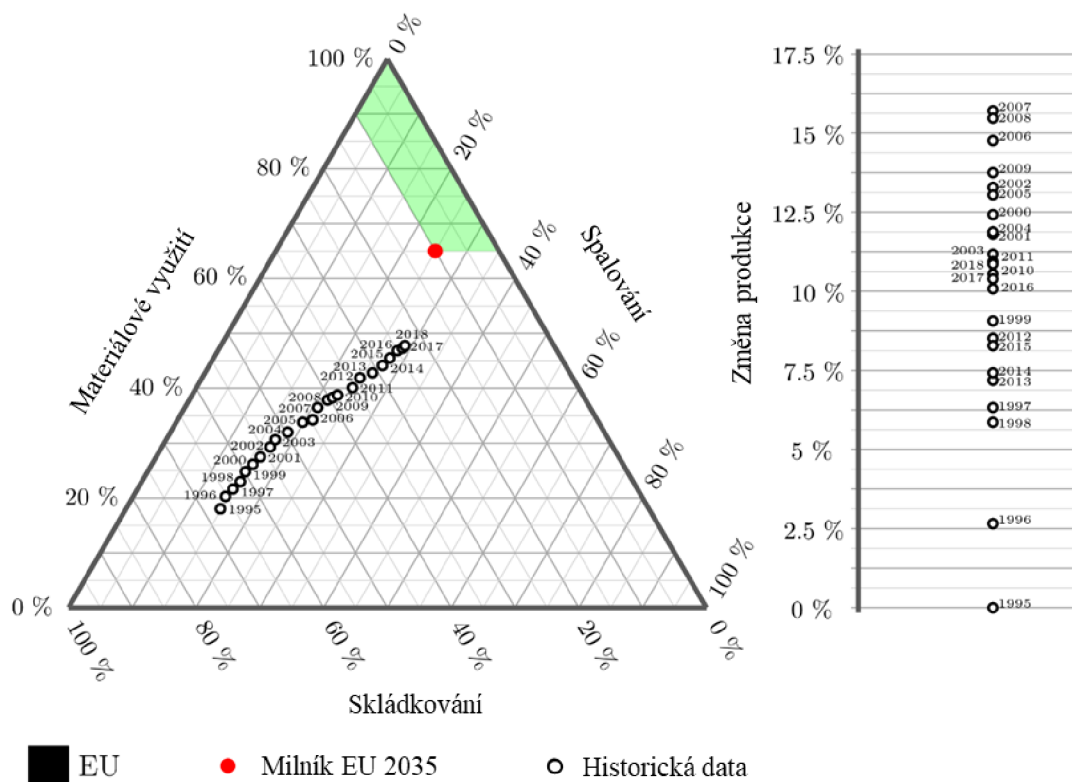
Odpadové hospodářství (OH) EU v současné době přechází z lineární podoby na oběhové hospodářství (ObH) [C1]. Modifikace OH je motivována potřebou nakládat s velkým množstvím odpadu a šetřit životní prostředí. Vhodné zpracování odpadu by také mělo nahradit a ušetřit některé omezené primární zdroje [C2]. Hladký a udržitelný přechod na ObH a transformace OH jsou legislativně upraveny *Balíčkem oběhového hospodářství* (CEP – Circular economy package). Cílem CEP je udržet hodnotu výrobků, materiálů a zdrojů co nejdéle na základě *Hierarchie způsobů nakládání s odpady*, Směrnice 2008/98/ES [C3]. Pro komunální odpad (KO) jsou zásadní Směrnice (EU) 2018/850 [C4], Směrnice (EU) 2018/851 [C5], Směrnice (EU) 2018/852 [C6]. Hlavními milníky zahrnutými v CEP jsou cíle materiálového využití KO v letech 2025, 2030 a 2035 a omezení jeho skládkování v roce 2035, viz obr. 1.



Obr. 1: Cíle Balíčku oběhového hospodářství [A1]

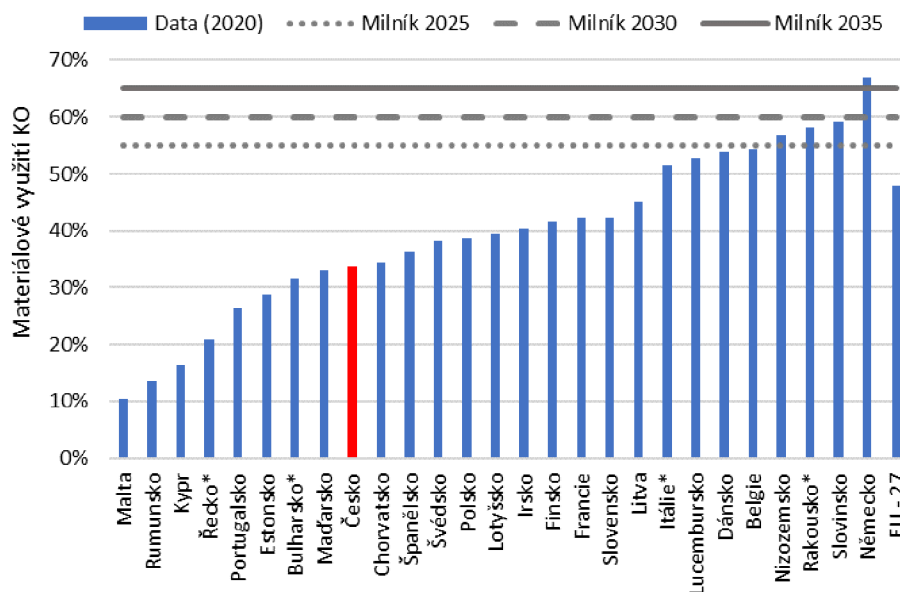
Na obr. 2 je znázorněn časový vývoj nakládání s KO na úrovni EU v období 1995–2018 pomocí ternárního diagramu. Orientace diagramu je zvolena podle Hierarchie způsobů nakládání s odpady [C3] tak, že preferované způsoby nakládání jsou umístěny nahoře. Je patrný zřejmý trend snižování skládkování a zvyšování materiálového využití KO. Současně dochází k mírnému nárůstu spalování odpadu. Spalování odpadu v zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO) představuje vhodnou metodu, jak naložit s nerecyklovatelnými složkami KO. Zeleně je v obr. 2 označena oblast, kde jsou splněny cíle v roce 2035 (poslední sledovaný rok dle CEP). Pravá část obr. 2 ukazuje procentuální změnu produkce odpadů vztahovanou k počátečnímu roku 1995. Při plánování OH v EU je tedy nutné zohlednit také očekávanou produkci KO (viz obr. 2).





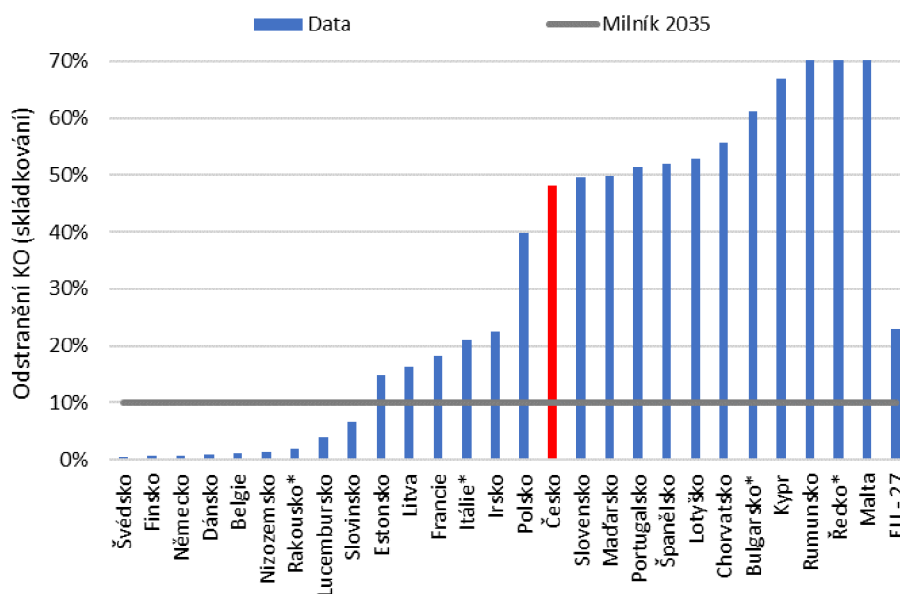
Obr. 2: Produkce a zpracování komunálního odpadu v EU, data 1995–2018, upraveno na základě [A1]

Hodnocení současné situace států EU ve vztahu k požadovaným recyklačním cílům je na obr. 3, jedná se o data za rok 2020 (nejnovější dostupná data o nakládání s KO databáze Eurostat [C7]). Jedinou zemí, která aktuálně plní nejpřísnější cíl stanovený pro rok 2035, je Německo. ČR, jako zástupce zemí v procesu přechodu z lineárního hospodářství na ObH, recykluje cca 34 % KO (červeně na obr. 3). Kromě recyklačních cílů musí členské státy reagovat také na omezení skládkování KO. Současný stav skládkování KO znázorňuje obr. 4. Limit pro skládkování stanovený pro rok 2035 již splňuje celkem 9 zemí EU, v ČR je v současnosti stále ukládáno na skládky asi 48 % KO. Celkem se v EU skládkuje asi 23 % KO. Bohužel většina zemí EU je v současnosti značně daleko od splnění recyklačních cílů a omezení skládkování, je tedy nutný zásah do současné podoby OH, aby bylo možné tyto cíle splnit.



Pozn: \* z důvodu nedostupných dat za rok 2020 se jedná o hodnoty za rok 2019

Obr. 3: Materiálové využití KO, členské státy EU, rok 2020, zdroj dat: Eurostat [C7]



Pozn: \* z důvodu nedostupných dat za rok 2020 se jedná o hodnoty za rok 2019

Obr. 4: Skládkování KO, členské státy EU, rok 2020, zdroj dat: Eurostat [C7]

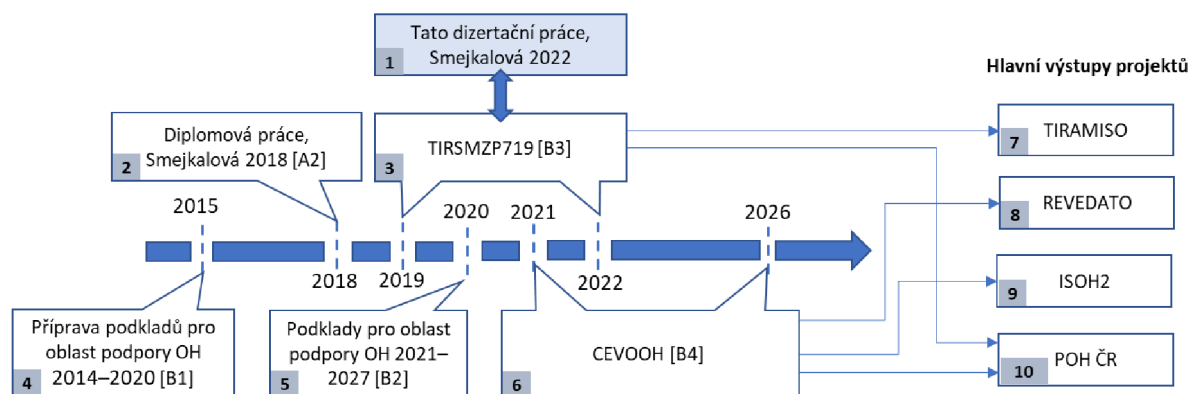
Cíle EU jsou stanoveny na úrovni států, ale každá země EU má pro splnění CEP jinou výchozí pozici, mezi jednotlivými státy EU jsou významné rozdíly v produkci KO a ve způsobech nakládání. Většina států již vykazuje postupný růst materiálového využití KO a omezování skládkování [A1], otázkou je, zda tímto vývojem lze dosáhnout požadovaného cíle včas dle milníků EU (obr. 1). Očekávaný vývoj OH za neměnných podmínek je možné odhadnout pomocí prognózy produkce a nakládání s odpady. Prognóza za stávajících podmínek bude v tomto textu značena BAU (business-as-usual). Díky výsledkům BAU lze odhalit potřebu zasáhnout do systému OH tak, aby bylo podpořeno splnění cílů EU.

Prognózou (BAU) se v tomto textu rozumí nejpravděpodobnější scénář budoucího vývoje. Vychází z historických dat a není do něj začleněn (až na nutné výjimky) expertní aspekt, tj. změna trendu vlivem očekávaných zásahů do OH. Prognóza nemá schopnost reagovat na legislativní a jiné zásahy do systému, ke kterým v budoucnu dojde. Projekce vzniká na základě definovaného scénáře budoucího vývoje. Projekce zohledňuje expertně nastavené okrajové podmínky, ovšem tak, aby co nejvíce odrážela historický průběh. Projekce by měla být co nejvíce v souladu s prognózou budoucího vývoje. Projekci lze tedy chápat jako expertní posouzení budoucího vývoje pomocí scénářů, které odráží situace, kdy je do systému zasahováno z vnějšku (legislativní vlivy, technologický pokrok atd.). Prostřednictvím projekcí je tedy možné modelovat scénáře dopadu konkrétních intervencí v OH. Prognóza a projekce produkce odpadů jsou důležitým podkladem pro strategické plánování OH na úrovni národní, krajské i obecní. Současně mohou být principy prognózy a projekce využity v komerční sféře.

V průběhu let byly navrženy různé modely pro prognózování produkce odpadu, jejich využití závisí na konkrétní aplikaci v OH. Pro volbu modelovacího přístupu jsou rozhodující zejména dostupná data, jejich územní a časový detail a také horizont prognózy. Pokud jsou pro modelování použity vlivné faktory a jejich vazby na produkci odpadu (např. lineární regrese), je třeba nejdříve prognózovat tyto faktory (viz kap. 2.3.1). Použití analýzy časových řad je často omezeno požadavky na délku časových řad (viz kap. 2.3.2). Existujících přístupů nelze využít, protože ve většině případů nejsou splněny požadavky na data (délka a detail časové řady, dostupnost socio-ekonomických dat). Navíc dosavadní přístupy nezohledňují vazby hierarchické struktury v datech. Proto byl vyvinut přístup „na míru“ pro prognózování produkce odpadu v ČR. Z provedené rešerše je patrné, že je často podceňována kvalita vstupních dat a měl by být významně větší důraz kladen na přípravu a pre-processing dat. Zároveň by měla být uživateli výsledků poskytnuta informace o nejistotě prognózy.

## 1.1 Cíle dizertační práce a zasazení do kontextu činností na ÚPI

Problematika prognózování produkce odpadů je na Ústavu procesního inženýrství (ÚPI) řešena dlouhodobě a zapadá do koncepce činností pro podporu plánování OH. Schematicky jsou vazby vybraných aktivit řešených na ÚPI, které souvisejí s prognózami produkce odpadu, znázorněny na obr. 5. Tato dizertační práce sumarizuje činnost autorky po dobu studia, jedná se o vypracované studie v rámci projektů (obr. 5) a publikované články.



Obr. 5: Znázornění vazeb činností na ÚPI

Prvním podnětem pro tvorbu prognóz produkce odpadu na ÚPI byl projekt řešený ve spolupráci se společností Ernst & Young (EY) v roce 2015 pro Ministerstvo životního prostředí (MŽP), [B1], v obr. 5 znázorněno číslem 4. Přístup k prognózování byl na ÚPI dále průběžně vyvíjen, např. formou diplomové práce [A2], která předcházela této disertační práci a byla obhájena v roce 2018 (číslo 2 v obr. 5). Na dosavadní činnost navázal v roce 2019 projekt [B3], číslo 3 v obr. 5. a dále také jako „TIRMZP719“. Vypracování této dizertační práce bylo významnou měrou doprovázeno řešením projektu TIRSMZP719. V projektu TIRSMZP719 se autorka podílela na tvorbě Certifikované metodiky [B5] pro prognózování produkce odpadů, která slouží jako podklad pro nástroj *TiramisO* (číslo 7 v obr. 5) užívaného MŽP [B6]. Bližší popis činností projektu TIRSMZP719 je dále v této kapitole. Průběžné poznatky projektu TIRSMZP719 byly v roce 2020 využity v projektu řešeného opět s EY pro MŽP, číslo 5 v obr. 5) [B2]. Autorka se podílela na vytvoření prognóz produkce následujících frakcí odpadů: KO pro materiálové využití, odpady pro energetické využití, biologicky rozložitelné odpady, nebezpečné odpady a kaly z čištění komunálních odpadních vod.

Cílem aktuálně běžícího projektu CEVOOH [B4] (číslo 6 v obr. 5) je vybudování interdisciplinární výzkumné základny tvořené klíčovými výzkumnými organizacemi disponujícími expertízou a odbornou kapacitou pro provádění výzkumu v oblasti OH a ObH. Hlavní tematickou oblastí, řešenou na ÚPI, je rozvoj nových monitorovacích nástrojů v OH. Základním zdrojem dat o produkci a nakládání s odpady je Informační systém odpadového hospodářství (ISOH) [C8], do kterého se data získávají z každoročního hlášení o produkci a nakládání s odpady dle Zákona 541/2020 Sb. o odpadech [C9]. Na původní databázi (tzv. archivní) je proveden přepočít pro odstranění duplicit vzniklých zapojením firem do systému OH obce, dopočet podlimitních subjektů apod. Výsledkem těchto úprav specifikovaných v dokumentu [C10] je Pracovní databáze ISOH (PDISOH). V rámci projektu CEVOOH vzniknou podklady pro vytvoření nové databáze PDISOH (tzv. ISOH2, číslo 9 v obr. 5), na jejichž formulaci se bude autorka podílet. Prvním krokem je analyzovat současný stav nakládání s odpady, což představuje obtížný úkol. To dokládá skutečnost, že v ČR je znám pouze aktuální stav pro agregovaná data na státní úrovni. Důvodem je ztráta informace při předání a převzetí odpadu a chyby ve vykazování. Proto další členové řešitelského týmu pracují na nástroji REVEDATO (číslo 8 v obr. 5), který má být doplňkovým produktem pro systém ISOH2. Po získání kvalitního odhadu současného stavu nakládání s odpady i na regionálních úrovních je možné zjistit potenciál pro změnu a provádět věrohodné prognózy. V návaznosti na dosavadní činnost se předpokládá spoluúčast autorky této práce a dalších členů týmu ÚPI na sestavení Plánu odpadového hospodářství (POH) ČR pro následující období (číslo 10 v obr. 5).

Jak už bylo zmíněno, náplň této disertační práce je motivována řešením projektu TIRSMZP719 (viz obr. 5). Aktivita zahrnuté v projektu TIRSMZP719 byly rozděleny do tří okruhů zahrnujících výsledky V1až V13. Jedná se o výsledky typu výzkumné zprávy (Vsouhrn), certifikované metodiky (NmetC) a software (R) vykázané v RIV:

- 1) Složení odpadů (V1–V4, V13) – nastavení postupů pro analýzy složení odpadů a jejich realizace.
- 2) Prognózování produkce odpadů (V5–V9) – nastavení procesu prognózování produkce všech odpadů v ČR na základě historických dat.
- 3) Software (V10–V12) – implementace přístupu prognózování produkce ve výsledný software *TiramisO* [B6].

První ze zmíněných okruhů (Složení odpadů) nemá přímou souvislost s touto dizertační prací. Autorka této závěrečné práce se aktivně podílela na řešení pěti výsledků (V5 až V9) z celkových třinácti výsledků, které spadají do druhého okruhu (Prognózování produkce odpadů). Cílem bylo zvolit vhodný přístup k prognózování a sestavit metodiku pro provedení prognóz produkce odpadu. V první fázi byla zpracována rozsáhlá rešerše shrnující poznatky dostupné literatury na téma modelování produkce odpadu (V5, Vsouhrn, [B7]). Možné přístupy pro prognózování byly testovány ve výsledku V6 s ohledem na dostupná data, která jsou v ČR k dispozici v podobě velmi krátké časové řady v ročním detailu. Výstupem výsledku V6 (Vsouhrn) [B8] bylo doporučení prognózovat produkci odpadu pomocí analýzy trendu v historických datech s následným vyrovnáním pro zachování vazeb v systému. Výsledek V7 (Vsouhrn) [B9] popsal matematický model prognózy. Na výsledek V7 navázal V8 (Vsouhrn) [B10], který specifikoval nastavení parametrů matematických přístupů a představil tvorbu projekcí produkce odpadu v podobě scénářů. Zásadní je výsledek V9 (NmetC), ve kterém vznikla Certifikovaná metodika pro provádění prognózy produkce odpadu [B5]. Metodika je rozdělena na čtyři fáze. Prvním krokem je příprava vstupních dat, následuje pre-processing zahrnující zejména odstranění anomálií v datech. V rámci processingu je proveden vlastní výpočet prognózy pomocí zvolené modelovací metody. Na závěr jsou v post-processingu výsledky zpracovány do vhodné podoby pro konečné uživatele. Přístup k prognóze popsaný v metodice V9 byl následně implementován do softwaru nazvaného TiramisO (číslo 6 v obr. 5, [B6]) v rámci výsledků V10 (R), V11 (Vsouhrn) a V12 (Vsouhrn).

Hlavním uživatelem výsledků projektu TIRSMZP719 je MŽP. Požadavky na prognózu bylo tedy možné průběžně korigovat se zástupci MŽP s ohledem na budoucí využití certifikované metodiky a softwaru.

Navržený přístup pro prognózování produkce odpadu zohledňuje následující požadavky na prognózu [B10]:

#### 1. Dostupná data o produkci odpadu

Přístup k prognóze je formulován obecně pro využití na různém detailu vstupních dat. Ve většině aplikací OH jsou však dostupné krátké časové řady historických dat. Základním zdrojem dat o produkci odpadu v ČR je databáze ISOH [C8], která vzniká z každoročního hlášení subjektů o produkci a nakládání s odpady. V současné době je v ISOH k dispozici 12 pozorování z minulých let počínaje rokem 2009, data jsou k dispozici v ročním detailu. U datové sady se očekává v budoucnosti nárůst dostupných dat a delší časová řada umožní podrobnější vzhled do historického vývoje a tím i zpřesnění prognózy. Navržený přístup prognózování je tedy možné aplikovat na časové řady různých délek, avšak umožňuje využití na velmi krátké časové řady.

#### 2. Období predikce

Délka predikčního horizontu je inspirována cíli EU. Požadavky Směrnice EU 2018/850 [C4] a Směrnice EU 2018/851 [C5] jsou dány do roku 2035 (viz obr. 1). Jako cílový rok prognózy byl zvolen rok 2040, aby bylo možné sledovat předpokládanou produkci odpadu také po klíčovém roku 2035. V současné době jsou dostupná data z období předchozích 12 let a prognóza je cílena na období následujících 20 let. Obecně nelze jasně stanovit hranici mezi krátkodobou a dlouhodobou prognózou, avšak úloha je komplikovaná tím, že se jedná o poměrně dlouhou prognózu na základě malého počtu historických dat.

### 3. Detail územního členění

Výpočet je cílen na více stupňů územního členění (stát, kraje, obce s rozšířenou působností – ORP, obce). Na základě konkrétní aplikace lze volit vhodný detail územního členění. Práce s daty na nižších úrovních má svá úskalí v podobě vysoké variability dat a vyššího výskytu odlehklých či chybějících hodnot. S ohledem na tento aspekt je tedy nutné věnovat značnou pozornost pre-processingu dat (kap. 2.2).

### 4. Členění frakcí odpadů

Model je sestaven tak, aby byl aplikovatelný na různé frakce odpadu, které jsou evidovány prostřednictvím katalogových čísel (kat. č.) [C11]. Kat. č. mohou být prognózována individuálně či v agregované formě (kap. 2.1).

### 5. Hierarchická struktura

Představený přístup využívá principů agregace dat, kdy díky agregaci dochází v některých případech k vyhlazení variability v datech. Agregace je uvažována jak z hlediska územního členění (obec, ORP, kraj, stát – viz bod 3. Detail územního členění), tak frakcí odpadů (papír, plast, sklo, separované složky, KO atd. – viz bod 4. Členění frakcí odpadu). Existence vazeb územního členění byla popsána v příspěvku [A3] jako „areal constraint“. Provázanost frakcí odpadu a územního členění bude nutné zachovat také v odhadech budoucí produkce, viz kap. 2.3.3.

### 6. Vyjádření nejistoty

Bodový odhad očekávané produkce odpadu je nutné doplnit o vyjádření nejistoty prognózy např. v podobě pásů spolehlivosti. Tato informace je nezbytná pro budoucí uživatele výsledků, kteří mohou zohlednit kvalitu prognózy a přizpůsobit se nejistotám. Součástí představeného přístupu k prognózování je konstrukce konfidenčních a predikčních pásů (kap. 2.3.4).

### 7. Scénářový přístup

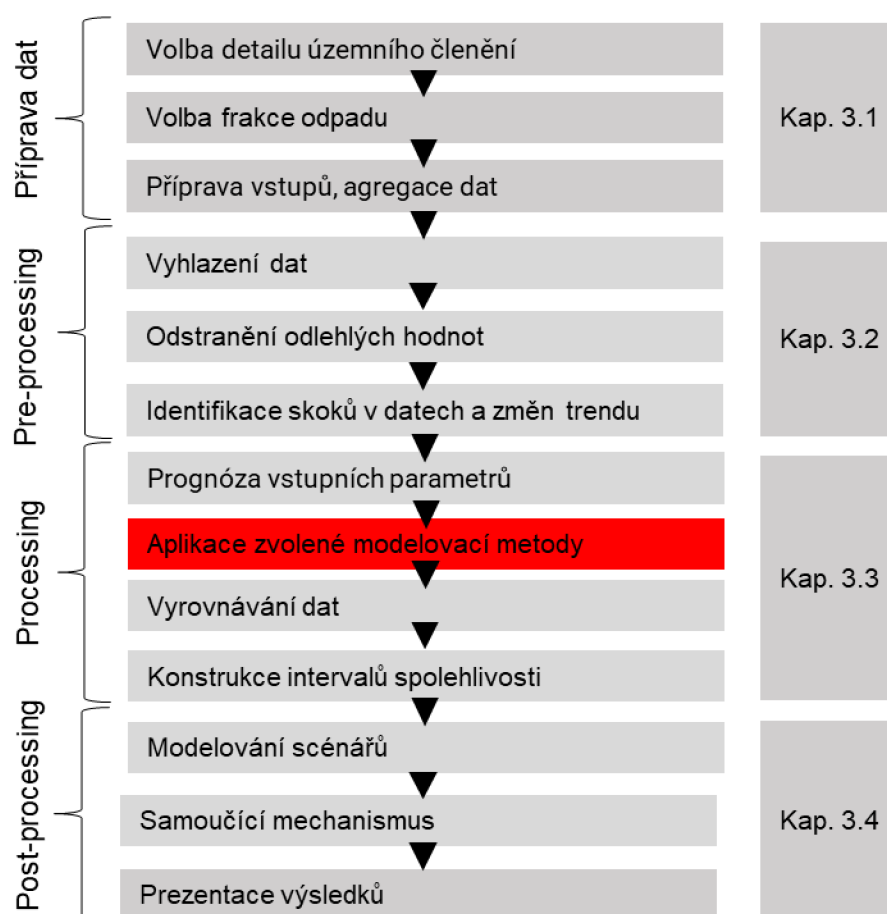
Prognózu produkce odpadu lze přizpůsobit očekávaným scénářům produkce. Základní scénář BAU vychází z již nastavených podmínek historických dat a jejich trendů. Dále je možné modelovat budoucí produkci odpadu vzhledem např. k cílům EU v požadovaném roce. Stanovený scénář se poté stane ukazatelem nutných změn oproti stávajícímu systému, pokud má být dosaženo příslušných cílů.

Cílem dizertační práce je návrh přístupu pro prognózování produkce odpadu vzhledem k výše uvedeným podmínkám v bodech 1 až 7. Náplň této práce vznikala souběžně s řešením projektu TIRSMZP719 [B3], čímž je zaručena uplatnitelnost výsledků.

V následující části textu je kap. 2 popisující koncept přístupu k prognóze a nezbytné části modelu, které by měla každá prognóza zohlednit. Návrh modelu byl aplikován na případové studie v kap. 3. Kap. 4 představuje využití prognózy produkce odpadu v modelech pro plánování OH. Závěrečné shrnutí je v kap. 5 a jsou přiblíženy možnosti dalšího vývoje. Výsledky prognóz produkce odpadu jsou zásadním podkladem při strategickém plánování v oblasti OH na státní i lokální úrovni.

## 2 PROGNOZA PRODUKCE ODPADU – POPIS PŘÍSTUPU

Na základě provedené rešerše [A4] a testovacích výpočtů provedených v projektu TIRSMZP719 (Výsledky V6–V8) byl navržen obecný přístup k prognóze (viz obr. 6). Prognóza produkce odpadu by měla zahrnovat 13 na sebe navazujících kroků, které lze rozdělit do čtyř částí: příprava dat, pre-processing, processing, post-processing. Aplikace zvolené metody (na obr. 6 zvýrazněno červeně) je pouze jedním z uvedených kroků. Přestože je výběr vhodné metody nezbytný pro získání kvalitního modelu, zásadní jsou i zbývající kroky, které jsou bohužel většinou opomíjeny [A4]. Dále v textu budou formulovány hlavní doporučení k jednotlivým částem prognózy. Detailní popis lze nalézt v rešerši [A4] a Certifikované metodice [B5].



Obr. 6: Schematické znázornění postupu prognózování produkce odpadu

### 2.1 Příprava dat

#### 2.1.1 Volba detailu územního členění

V prvním kroku je třeba shromáždit dostupná data. Historická data je nutné upravit na požadovanou územní jednotku. Dostupné datové sady nezávislých proměnných se mohou lišit pro různý detail územního členění. Obecně platí, že u většího detailu územního členění (např. úroveň obcí) dochází k větší variabilitě dat (kap. 7.1 Certifikované metodiky [B5]).

### 2.1.2 Volba frakce odpadu

Prognózované frakce odpadu jsou voleny s ohledem na cíle prognózy (kap. 7.2 Certifikované metodiky [B5]). Data o produkci odpadů mohou zahrnovat frakce, které ovlivňují produkci dalších složek. Vzájemně závislé frakce odpadu by měly být modelovány společně a tato vazba by měla být zohledněna. Například lze očekávat závislost mezi produkcí SKO a separovaného odpadu (SEP) [A7]. V některých aplikacích může být vhodné prognózovat produkci těchto závislých frakcí odpadu v absolutním množství jako celek (např. SKO + SEP) a současně množství jednotlivých frakcí jako poměrnou část z celku (např.  $SKO/(SKO+SEP)$ ). Tímto způsobem prognózování dojde k vyhlazení historických dat.

### 2.1.3 Příprava vstupů, agregace dat

Charakter dostupných dat ovlivňuje výběr modelovací metody (kap. 8.1 Certifikované metodiky [B5]). Údaje nižších celků lze agregovat pro získání chybějících hodnot za vyšší územní celky. Agregace také snižuje variabilitu dat, která je výraznější na nižších úrovních. Dostupný soubor dat lze navíc rozšířit pomocí prediktivních modelů [C12], kdy je produkce odpadu modelována na základě vlivných faktorů. Data musí být často normována na vhodnou jednotku, aby bylo možné hledat vazby s vybranými proměnnými. Normování nebo standardizace se vztahuje jak na data o produkci odpadu, tak na socioekonomická data. Nejběžnější je normování na obyvatele nebo plochu. Rozsah dat lze také přizpůsobit pro lepší interpretovatelnost (např. počet obchodů na 1000 obyvatel). Pokud údaje nejsou normovány na obyvatele, doporučuje se v modelech neuvažovat extrémní hodnoty. Obvykle se může jednat o hlavní města, která kvůli své velikosti mohou mít značný vliv na podobu výsledného modelu. Pro některé proměnné je přínosné transformovat data pomocí vhodné funkce, aby bylo dosaženo rovnoměrnějšího rozložení hodnot. Správná transformace dat je výhodná vzhledem k častému výskytu heteroskedasticity, nejčastěji se používá logaritmická transformace. S případnými nulovými hodnotami je třeba zacházet opatrně. Pro nulové hodnoty není logaritmická transformace definována vůbec, hodnoty blízké nule budou mít po logaritmické transformaci neúměrně velký vliv na výsledky prognózy.

## 2.2 Pre-processing dat

Při práci s daty je nutné zabývat se vlastnostmi, které by mohly negativně ovlivnit výsledný model. Fáze pre-processingu byla zahrnuta pouze u 26 studovaných článků z celkového počtu 108. Problém s identifikací různých datových anomálií (odlehle hodnoty, skoky v datech a změny trendu) nastává zejména v koncových bodech časových řad. Označit koncový bod jako anomálii je riskantní, protože není známý následný vývoj dat a koncový bod má významný vliv na podobu trendu v datech. Jediný způsob, jak zhodnotit výsledky a vyhodnotit kvalitu pre-processingu, je vizuální posouzení historických dat.

### 2.2.1 Vyhlazení dat

Před modelováním produkce odpadu je vhodné zvážit úpravu historických dat, pokud existuje významná vazba na některé regresory. Příkladem mohou být ekonomické cykly nebo jednorázové situace, jako je pandemie covid-19 (kap 8.2 Certifikované metodiky [B5]). Historická data je možné očistit o jejich vliv v průběhu času a následně modelovat očekávaný vývoj bez vlivu těchto faktorů.



## 2.2.2 Odstranění odlehlých hodnot

Zásadní je sledovat výskyt odlehlých hodnot v datech, které mohou výrazně zkreslit výslednou prognózu [C13]. Využití běžných metod pro krátké časové řady je problematické [C14]. Je tedy nutné použít nějakou kombinaci přístupů, které s daty nakládají opatrně a doplňují je o expertní názor. Tímto způsobem lze eliminovat riziko chybné identifikace odlehlých hodnot. Na základě zkušeností s OH lze doporučit kombinaci Holtovy metody pro odstranění trendu a Grubbsova testu pro identifikaci odlehlých hodnot z reziduí (kap. 8.2.1 Certifikované metodiky [B10]). V souvislosti s daty z databáze ISOH se doporučuje pro další analýzy zcela vyloučit první rok dostupných dat, 2009. Tento rok vykazuje významně vyšší výskyt odlehlých hodnot, z důvodu přechodu na novou metodiku vykazování produkce odpadu.

## 2.2.3 Identifikace skoků v datech a změn trendu

Pro identifikaci skoků v datech a změn trendu byly testovány běžně užívané přístupy, avšak nebylo dosaženo přijatelných výsledků pro krátké časové řady [B9]. Byla tedy sestavena metoda, která je schopna identifikovat skoky v datech a změny trendu na krátké časové řadě [B5]. Doporučuje se dodržet následující body, viz Příloha 3 Certifikované metodiky [B11]:

- Využít vizualizace dat, pokud to množství časových řad umožňuje.
- Neidentifikovat více skoků nebo změn trendu v jedné časové řadě, pokud časová řada nemá více než 15 hodnot.
- Pokud je tvořen obecný postup, pak data znormovat, což umožní nastavit stejnou hodnotu kritické meze pro všechny časové řady.
- Zaměřit se na úhly mezi dílčími subsekvencemi dat a úhly spojnic historických dat s osou  $x$ , na které je průběh v čase.
- Stanovit minimální počet dat, který má být po pre-processingu zachován pro další kroky přístupu prognózování.

Pro další kroky prognózy jsou uvažovány body časové řady za identifikovanou změnou. Detailní popis navrženého přístupu je k dispozici v (Příloha 3 Certifikované metodiky [B11]).

## 2.3 Processing

### 2.3.1 Prognózy vlivných faktorů

Pokud mají být pro prognózu produkce odpadu využity vlivné faktory z oblasti ekonomie, sociologie aj., je nutné nalézt kvalitní model, který popisuje produkci odpadu pomocí těchto vlivných faktorů. Kvalitu modelů je možné zlepšit s využitím shlukové analýzy a následným sestavením modelů pro jednotlivé shluky [C15]. Pro provedení prognózy produkce odpadu pomocí vlivných faktorů je nutné disponovat prognózami všech těchto faktorů [C16]. Na státní úrovni jsou k dispozici prognózy mnoha vlivných faktorů (zejména ekonomických), požadované hodnoty však nejsou dostupné pro větší detail území. Často jsou tvořeny jen krátkodobé prognózy nepokrývající celý predikční horizont, proto je dostupnost těchto prognóz velmi limitující požadavek. Navíc platí, že mnoho prognóz vlivných faktorů není doplněno vyjádřením nejistoty. Pokud jsou k dispozici intervaly spolehlivosti, je zřejmé, že prognózy vlivných faktorů mají značnou míru nejistoty [C17]. Do modelování produkce odpadu by zahrnutím těchto faktorů vstoupila významná chybovost. Není tedy žádoucí zahrnout tyto chyby, které jsou součástí prognózy vlivných faktorů, do prognózy produkce odpadů.

Prognózy demografických faktorů se ale liší od socioekonomických charakteristik diskutovaných výše. Demografické projekce jsou obvykle prováděny z dlouhodobého hlediska s uspokojivou přesností [C18], ale bohužel obecně nejsou dostupné pro menší regiony. Je třeba poznamenat, že demografické modely jsou projekce, protože jsou vytvářeny ve formě scénářů. Pro prognózu produkce KO se doporučuje využít informaci o demografické projekci na úrovni státu a krajů, jako zdroj dat lze využít projekce obyvatelstva do roku 2070 vyhotovené Českým statistickým úřadem (ČSÚ) [C19].

Vzhledem k tomu, že nejsou dostupné prognózy všech vlivných faktorů v potřebném detailu a kvalitě, doporučuje se využít pro prognózování v OH přístupy založené na analýze časových řad se zohledněním demografie.

### 2.3.2 Aplikace zvolené metody

Konkrétní metoda pro analýzu časových řad musí být zvolena s ohledem na detail historických dat a zejména délku časové řady. Úlohy lze rozdělit do dvou základních typů:

- 1) Data jsou k dispozici v detailu let: V datech je možné zkoumat pouze trendovou složku, kterou lze modelovat vhodným funkčním předpisem. Do této kategorie spadá většina dat dostupných ke strategickému plánování OH.
- 2) Data jsou k dispozici v detailu dnů, týdnů, maximálně měsíců: Je možné navíc sledovat cyklickou a sezónní složku. Obvykle se jedná o krátkodobé prognózy [A4].

Navržený přístup k prognóze je založen na modelování trendu v historických datech umožňující využití na datech v detailu let (viz bod 1 výše). Jedná se však o univerzální přístup aplikovatelný na data v různém časovém detailu, avšak modelován je výhradně trend v datech bez zohlednění cyklické a sezónní složky. Podle charakteru dat se doporučuje využít pro model trendu mocninnou funkci (1), nebo S-křivku v podobě logistické funkce (2). Model S-křivky (2) by měl být aplikován, pokud data vykazují exponenciální nárůst/pokles produkce, protože umožní omezení nereálného nárůstu/poklesu trendu. Případně je možné využít jiné funkční předpisy splňující předpoklad monotonie, které kvalitně popisují chování dat.

$$p_t = a + bt^c, \quad (1)$$

$$p_t = \frac{1}{1 + e^{-(a+bt)}}, \quad (2)$$

$$p_t \geq 0. \quad (3)$$

Ve výše uvedených rovnicích  $p_t$  zastupuje závisle proměnnou, tedy množství produkovaného odpadu a  $t$  představuje čas. Hledané regresní koeficienty jsou  $a, b, c$ . Předpokládá se nezápornost produkce odpadu v podmínce (3). Závisle proměnná  $p_t$  je uvažována v absolutním množství vyprodukovaného odpadu, nebo vztažená na jednoho obyvatele v závislosti na tom, zda se pro modelovanou řadu zohledňuje demografická projekce (viz 2.3.1). Detaily pro volbu funkčního předpisu jsou popsány v dokumentech [B5] a [A1]. Z důvodu nelinearity je pro dosažení kvalitního proložení dat zásadní nastavení počátečních hodnot koeficientů  $a, b, c$  (resp.  $a, b$  pro logistickou funkci). V případě mocninné funkce (1) se doporučuje využít linearizaci bez absolutního členu  $a$ , poté pro nastavení počátečního odhadu  $b, c$  využít zlogaritmovanou rovnici:

$$\ln p_t = \ln b + c \ln t. \quad (4)$$

Tato rovnice vede na řešení úlohy lineární regrese. Logistickou funkci lze linearizovat na tvar:

$$\ln \frac{p_t}{1 - p_t} = a - bt. \quad (5)$$

Hodnoty koeficientů  $a, b$  linearizované podoby (5) jsou počátečními odhady logistické funkce (2).

K proložení dat jednoduchým modelem s konstantní hodnotou se doporučuje přistoupit v následujících případech:

1. Vyloučením dat po pre-processingu zůstává pro modelování trendu příliš krátká časová řada. Jako minimální množství dat pro modelování trendu křivkami v projektu TIRSMZP719 [B3] jsou požadovány aspoň 4 body historických dat v posledních 6 letech a současně minimálně 5 bodů historických dat celkově. Počet minimálního počtu dat lze přizpůsobit konkrétní délce časové řady.
2. Model trendu v datech s využitím výše popsaných funkcí je málo kvalitní. Jako kritérium se doporučuje využít  $R^2$ . V kritickou mez  $R^2$  je možné přizpůsobit. V aplikaci softwaru TiramisO [B6] je extrapolace provedena průměrem v datech, pokud pro model trendu v datech platí, že  $R^2 < 0,1$ .
3. Jednoduchý model s konstantním průběhem vede ke srovnatelným výsledkům jako složitější model. Je přistoupeno k modelování trendu průměrem, aby se zabránilo využití komplikované podoby modelu, pokud změna oproti jednoduchému modelu (průměru v datech) je velmi malá. Kritérium pro model pomocí průměru se doporučuje následující:

$$\frac{|p_{2040} - \bar{x}|}{\bar{x}} < 0,05, \quad (6)$$

kde index  $p_{2040}$  značí hodnotu trendu v datech v roce 2040, tedy posledním roce sledovaného období. Dále  $\bar{x}$  je průměr historických dat pro sledovanou časovou řadu. I v tomto případě je možné kritickou mez 0,05 v podmínce (6) uzpůsobit konkrétním datům a požadavkům na prognózu.

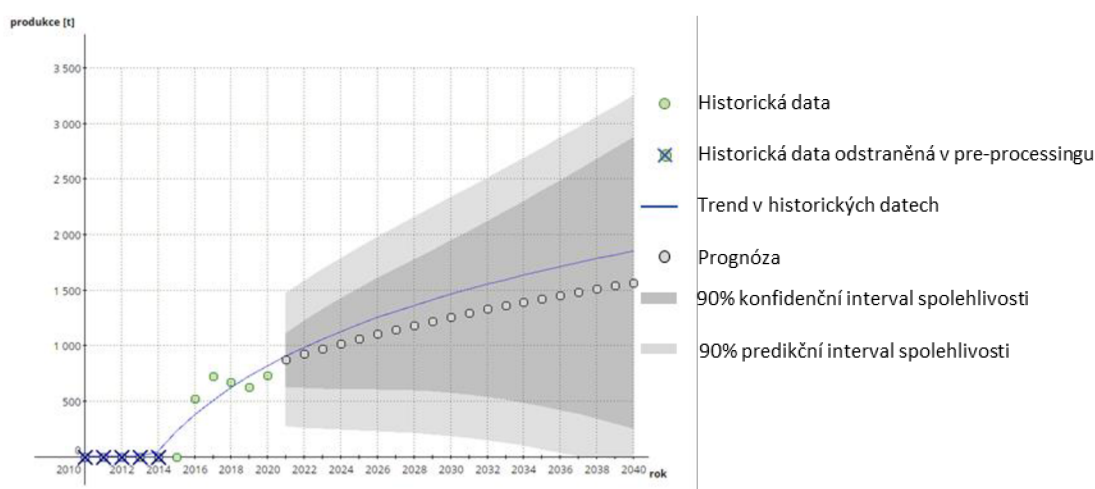
Specifický přístup se doporučuje uvažovat pro časové řady, které v posledních letech evidovaly nulovou produkci modelovaného odpadu. V takových časových řadách se nepředpokládá opětovné zahájení produkce tohoto odpadu a doporučuje se extrapolovat jako nulovou hodnotu (podrobnosti viz Příloha 4 Certifikované metodiky [B11]).

Při výběru vhodné metody modelování je třeba věnovat pozornost speciálním případům nebo vazbám v odpadových tocích. Příkladem může být vliv vnějšího zásahu do systému např. v podobě legislativní změny, která způsobí změnu trendu. V některých případech legislativních zásahů mohou být zavedeny i zcela nové toky odpadů. Tyto anomálie by měly být odhaleny v rámci pre-processingu (kap. 2.2). Problém je v tom, že historická data ovlivněná vnějším zásahem nelze použít pro prognózování obvyklým způsobem. Jednou z možností je při prognóze se změnou trendu zohlednit vývoj v ostatních regionech s využitím principů teorie kredibility. Tedy regiony, které již zareagovaly na vnější zásah změnou trendu, mohou naznačovat budoucí směřování těch regionů, které na zásah reagují se zpožděním. Obdobu lze pozorovat na státní úrovni, kde se postupně instalují zpracovatelské kapacity pro materiállové a energetické využití i v zemích s méně rozvinutým OH. Tato úvaha byla využita pro prognózu bio-odpadu v ČR (kap. 3.2.3 a [A9]). Povinnost umožnit separovaný sběr bio-odpadu je v ČR platná od roku 2014 a producenti se této změně přizpůsobovali postupně.

Přístup k prognózování se doporučuje přizpůsobit také v případech frakcí odpadu, jejichž množství přímo reaguje na vývoj některých vnějších faktorů. Typickým příkladem je kovový odpad, který je vázán na výkupní cenu suroviny. Výkupní cenu je obtížné předvídat kvůli jejímu cyklickému chování, což značně komplikuje prognózu kovového odpadu.

### 2.3.3 Vyrovnávání dat

Historická data o produkci odpadů mohou obsahovat vnitřní vazby zejména z důvodu agregace dat, které tvoří hierarchickou strukturu [A3]. Vlivem agregace dat je možné specifikovat dva základní typy vazeb – pro územní členění a odpadové frakce. Předpokládá se, že množství odpadu vyprodukovaného na území vyššího územního celku se rovná součtu množství odpadů na územích, která mu náleží (např. obce nacházející se v určitém kraji). Vazba platí také pro agregace odpadových frakcí. Navíc se mohou vyskytovat vazby mezi frakcemi odpadu (např. SKO a SEP) [A5], kdy vyšší produkce separovaného odpadu snižuje produkci SKO. Tyto vazby by měly být zachovány také v modelech prognózy (kap. 8.3.3 Certifikované metodiky [B5]). Většina modelovacích přístupů nezajišťuje konzistenci na různých úrovních hierarchie, rozdílnost modelů v důsledku jiného pořadí agregace byla popsána v článku [A3], viz kap. 3.1. Pro obnovení základních pravidel agregace by měly být vyrovnány výsledky aplikovaného modelu z kap. 2.3.2. Doporučuje se upravit výsledky modelů pomocí vyrovnávání dat (data reconciliation [A3]). Kvalita vstupních modelů z předchozího kroku (kap. 2.3.2) by pro vyrovnání dat měla být zohledněna ve formě nastavení vah [A1]. Vyrovnávání dat v rámci prognózy má navíc schopnost případně zkorigovat model trendu v historických datech, který nemá zřejmý vývoj např. důsledkem nejednoznačného pre-processingu dat. Příklad na obr. 7 ukazuje historická data, kde byla identifikována změna trendu v roce 2015 a pro model jsou tedy uvažována data od roku 2015. Podle vizuálního posouzení této časové řady by další možností bylo shledat v datech skok v roce 2016 a uvažovat data až od tohoto roku, což by vedlo k trendu v datech s pomalejším růstem. Rozhodnutí o typu anomálie v těchto datech není jednoznačné. Výsledná prognóza po vybilancování dat očekává nižší produkci odpadu, než je modelovaný trend v datech (viz obr. 7). Došlo tak ke zkorigování trendu díky vyrovnání dat odpovídající územní hierarchii. Výsledkem tohoto kroku je základní scénář prognózy (BAU).



Obr. 7: Ukázka odklonu prognózy od trendu v datech, TiramisO [B6]

### 2.3.4 Konstrukce intervalů spolehlivosti

Pro uživatele výsledků prognózy je zásadní informace o nejistotě modelu. Každá prognóza by měla mít k dispozici konfidenční intervaly (intervalový odhad trendu) a ideálně i predikční intervaly (intervalový odhad pro individuální pozorování). Pokud byl u dat využit model pro vyrovnávání dat (předchozí krok), není možné použít běžné přístupy pro konstrukci těchto intervalů využívající normální rozdělení pravděpodobnosti kolem modelu. Doporučuje se tedy simulovat konfidenční i predikční intervaly s využitím principu bootstrapu. Historická data vystupují jako jeden konkrétní scénář (kap. 8.3.4 Certifikované metodiky [B5] a [A1]) a rozptyl historických dat se využívá pro generování nových datových sad. Pro tato vygenerovaná data se vytvoří prognóza, čímž vznikají různé realizace prognózy. Na základě vlastností prognóz pro jednotlivé realizace jsou sestaveny intervaly spolehlivosti [A1]. Rozptyl jednotlivých prognóz různých datových sad se využije pro nadefinování konfidenčního intervalu kolem základního scénáře pomocí kvantilu Studentova rozdělení. Predikční interval je doplněn o rozptyl skutečných historických dat kolem trendu.

Bohužel časové řady jsou pro dlouhodobé posouzení úspěšnosti prognózy včetně intervalů spolehlivosti příliš krátké, takže přístup byl hodnocen pouze pro prognózu s ročním výhledem. Prognóza byla provedena na historických datech z období 2010–2019 a data z roku 2020 byla zachována pro vyhodnocení. Celkový datový soubor pro testování obsahoval 206 ORP a 17 frakcí odpadů, což odpovídá 3 502 časovým řadám. 90% predikční interval pro prognózu v roce 2020 pokrýval 85 % reálných dat z roku 2020. Tato hodnota byla získána mediánem z výsledků jednotlivých druhů odpadů. Mediánový přístup je méně citlivý na odlehle frakce odpadu, které se mohou objevit v případech neočekávaných legislativních zásahů nebo chyb v historických datech. Podobně podhodnocené výsledky byly získány pro intervaly s různou hladinou významnosti. 70% predikční intervaly pokrývají 62 % datových bodů a 50% predikční intervaly pokrývají 49 %. Predikční intervaly by dle výsledků měly být širší. Na druhou stranu lze výsledky považovat za vyhovující, protože odchylka není velká s ohledem na vývoj v oblasti OH. Testování tohoto přístupu potvrzuje výhodu vyrovnávání dat (kap. 2.3.3), protože reálná data jsou ve většině případů blíže vyrovnaným datům než trendům.

## 2.4 Post-processing

### 2.4.1 Modelování scénářů

Klasické přístupy pro modelování obvykle neposkytují projekce, přestože se jedná o velice přínosné informace z pohledu plánování OH. Vytvořené projekce se odklánějí od BAU tak, že splňují požadavky scénáře a předem definované okrajové podmínky [C20]. OH je obor, ve kterém často dochází k úpravám legislativy a je užitečné odhadnout potenciál pro případné změny. V souvislosti s cíli EU (kap. 1) je zásadní plánovat zejména materiálové využití KO, jehož nutným předpokladem je dostatečná separace odpadu. Legislativní zásahy probíhají na úrovni státu nebo jiných samosprávních celků, splnění cílů na státní úrovni je však výsledkem činnosti nižších územních celků. Součástí přístupu k modelování projekcí je rozpuštění jednotlivých scénářů až na úroveň obcí podle jejich potenciálu pro změnu (kap. 3.3 Certifikované metodiky [B5]). Při použití projekcí se doporučuje zohlednit vazby mezi frakcemi odpadu [A7], které mají značný vliv na potenciál pro navýšení separace odpadu.

Projekce produkce KO vycházejí z informace o složení odpadu, zejména SKO. Separovatelné frakce odpadu (papír, plast, sklo atd.) vyskytující se v SKO specifikují potenciál pro zvýšení míry separace KO. Složení SKO se obvykle určuje pomocí manuálních rozborů, ale lze provést pouze omezený počet takových analýz. Pro odhad výsledného složení SKO je rozhodující výběr vzorků pro provedení rozborů založený na stratifikaci území. V příspěvku [A8] byly popsány metody územní stratifikace a byl představen model pro výběr reprezentantů. Představený přístup byl aplikován na socioekonomická a demografická data za ČR na úrovni ORP. Model rozděluje území do shluků a vybírá vhodné reprezentanty tak, aby byla pokryta co největší variabilita území. Současně je zohledněn počet obyvatel a počet ORP v každém shluku pro počet vybraných reprezentantů v jednotlivých shlucích.

#### **2.4.2 Samoučící mechanismus**

Při změně nebo doplnění sady vstupních dat je vyžadována aktualizace výsledků. Databáze ISOH [C8] je každoročně doplněna o data za uplynulý rok z hlášení o produkci a nakládání s odpady. Hlášení podávají do 28. února subjekty, které produkují více než 600 kg nebezpečných odpadů nebo 100 tun ostatních odpadů, nebo s odpadem nakládají [C9]. V případě dynamických dat je nutné rychle reagovat a vyvinout adekvátní metodiku [C22]. Příkladem může být prognóza při použití chytrých technologií, např. nádoby vybavené čipy a senzory sledující naplněnost.

#### **2.4.3 Prezentace výsledků**

Důležitou součástí prognózy je vhodná interpretace a prezentace výsledků. Výsledky musí být předány tak, aby je uživatelé prognóz mohli snadno interpretovat. Je možné použít grafy, tabulky nebo mapové výstupy, reprezentativní vizualizaci výsledků lze nalézt např. v článku [C21].

### 3 PŘÍPADOVÉ STUDIE PRO VYBRANÉ FRAKCE ODPADU

V následujícím textu budou představeny případové studie, kdy byl aplikován přístup k prognózování představený v kap. 2 dle Certifikované metodiky [B5]. V jednotlivých studiích bude upřesněn zdroj historických dat vstupujících do výpočtu. Většinou jsou využita data z databáze ISOH [C8], která byla ÚPI poskytnuta pro řešení projektu TIRSMZP719. Jedná se o neveřejná data, proto nebudou historická data u některých případových studií konkretizována a v grafických výstupech budou nahrazena trendem. Zobrazena budou pouze volně dostupná data, která jsou součástí Veřejné databáze ISOH (VISOH) [C23]. Případové studie v této kapitole jsou dále zařazeny do prognózy nebezpečného odpadu (NO) v kap. 3.1, prognózy KO v kap. 3.2 a projekcí KO v kap. 3.3.

#### 3.1 Prognóza produkce nebezpečného odpadu

NO vykazuje alespoň jednu z nebezpečných vlastností dle Zákona o odpadech [C19], nebo se zařazuje do druhu odpadu, kterému je v *Katalogu odpadů* [C11] přiřazena kategorie nebezpečný odpad. Opakem je tzv. „ostatní odpad“, jedná se o odpad, který není řazen k NO. U NO je nutné rozlišovat dvě různé kategorie, podle kterých může být odpad klasifikován jako NO:

1. Kategorie odpadu dle Katalogu odpadu: NO je určen seznamem konkrétních kat. č. specifikovaných v Katalogu odpadů (např. kat. č. 20 01 13 – rozpouštědla). Katalog odpadů [C11] zahrnuje celkem 331 kat. č. řazených k NO z celkového počtu 842 kat. č.
2. Kategorie odpadu ohlášená: při evidenci produkce a nakládání s odpady má zadavatel povinnost do systému označit odpad za nebezpečný, pokud vykazuje nebezpečné vlastnosti, bez ohledu na nebezpečnost podle 1. Kategorie (výše). Podle tohoto kritéria se jako NO mohou vyskytovat i odpady označené podle Katalogu odpadu jako ostatní.

Ve většině případů však obě kategorie pro hodnocení nebezpečných vlastností odpadů korespondují. V dalších výpočtech bude jako NO uvažován odpad podle 2. Kategorie. V databázi ISOH je tato informace označena jako „Kategorie odpadu ohlášená“.

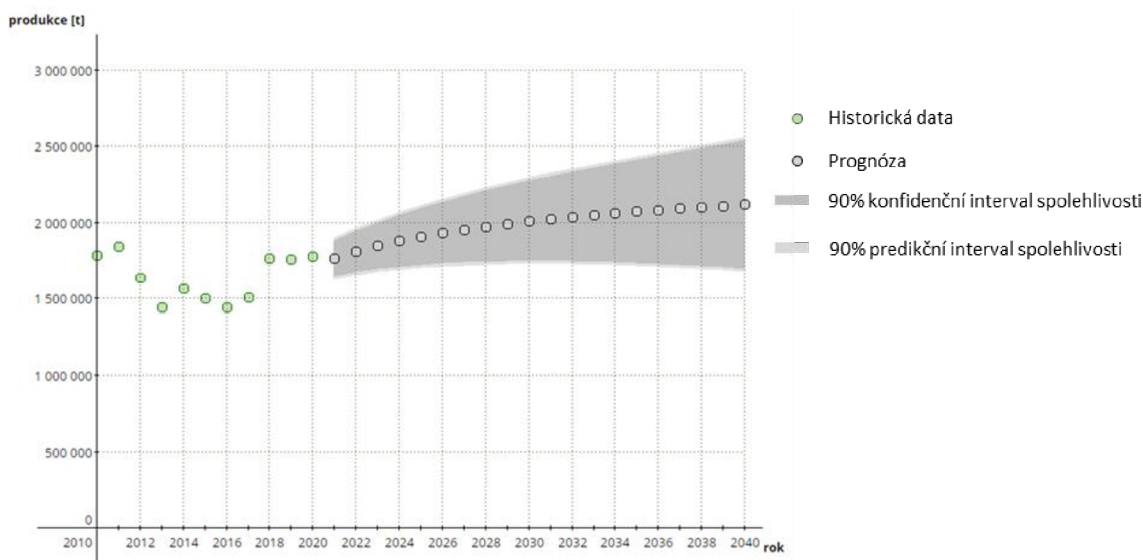
Je možné rozlišovat mnoho druhů NO podle fyzikálních vlastností, složení, výhřevnosti, nebezpečných vlastností (toxicita) atd. Podle Zákona o odpadech [C9] jsou stanovena pravidla pro nakládání s NO. Pro případovou studii v ČR [A3] byl NO rozdělen podle preferovaného způsobu zpracování do šesti proudů. Agregací kat. č. NO do kategorií výše dle nakládání došlo k významnému snížení výpočetní náročnosti úlohy a byla zachována informace očekávané produkce NO s určitým způsobem nakládání. Současně byla zohledněna hierarchie územního členění pro ORP, kraje a ČR. Pro případovou studii [A3] byla dostupná historická data z období 2009–2015, prognóza byla provedena do roku 2020.

Na historických datech byla provedena extrapolace dat s využitím mocninné funkce (viz kap. 2.3.2) na všech úrovních územního členění a pro všechny kategorie NO dle nakládání. Extrapolované hodnoty byly následně bilancovány pro zachování hierarchické struktury územního členění (viz kap. 2.3.3). Ve studii [A3] je detailně popsán přístup k bilancování extrapolovaných dat.

Prognóza produkce NO byla oproti studii [A3] aktualizována v rámci softwaru TiramisO s dostupnými daty 2010–2020. Dále budou prezentovány aktualizované výsledky. V rámci softwaru byla prognózována všechna kat. č. bez zařazení do kategorií podle zpracování, jako

tomu bylo ve studii [A3]. Prognóza pro všechna kat. č. byla možná díky efektivnější implementaci výpočtů.

NO bylo v ČR v posledním roce 2020 vyprodukováno 1 781 kt [C23]. Většina z tohoto množství je odpad produkovaný firmami, obce produkovaly v roce 2020 pouze asi 2 % NO z jeho celkové produkce. Na obr. 8 je znázorněna prognóza NO daná agregací kat. č. NO. Do roku 2040 se očekává nárůst produkce NO asi o 19 % na 2 118 kt, pokud bude zachován dosavadní trend. Tento fakt by měl být zohledněn při plánování zpracovatelských kapacit.



Obr. 8: Prognóza produkce NO, úroveň ČR, výpočet: Tiramiso [B6], zdroj dat: [C23]

## 3.2 Prognóza pro oblast komunálního odpadu

Prognóza KO je pro plánování OH zásadní zejména s ohledem na cíle přijaté v CEP (kap. 1). Pomocí prognózy KO je možné odhalit nutnost zásahu do stávajícího systému OH tak, aby bylo možné dosáhnout cílů EU. KO je dle Zákona o odpadech [C9] směsný a tříděný odpad z domácností a z jiných zdrojů, pokud je do povahy a složení podobný odpadu z domácností. KO nezahrnuje odpad z výroby. V ISOH je KO evidován kat. č. poskupiny 15 01 a skupiny 20 (bez 20 03 04 a pro data za rok 2020 a roky následující i bez 20 03 06 a 20 02 02). Od roku 2021 došlo ke změně legislativy ČR [C25] a podskupina 15 01 již není uvažována jako KO. Odpad doposud evidovaný kat. č. 15 01 je od roku 2021 evidován ekvivalentními kat. č. skupiny 20. Např. odpad kat. č. 15 01 01 (papírové obaly) je evidován jako kat. č. 20 01 01 (papír a lepenka).

### 3.2.1 Prognóza produkce a zpracování komunálního odpadu ve státech EU

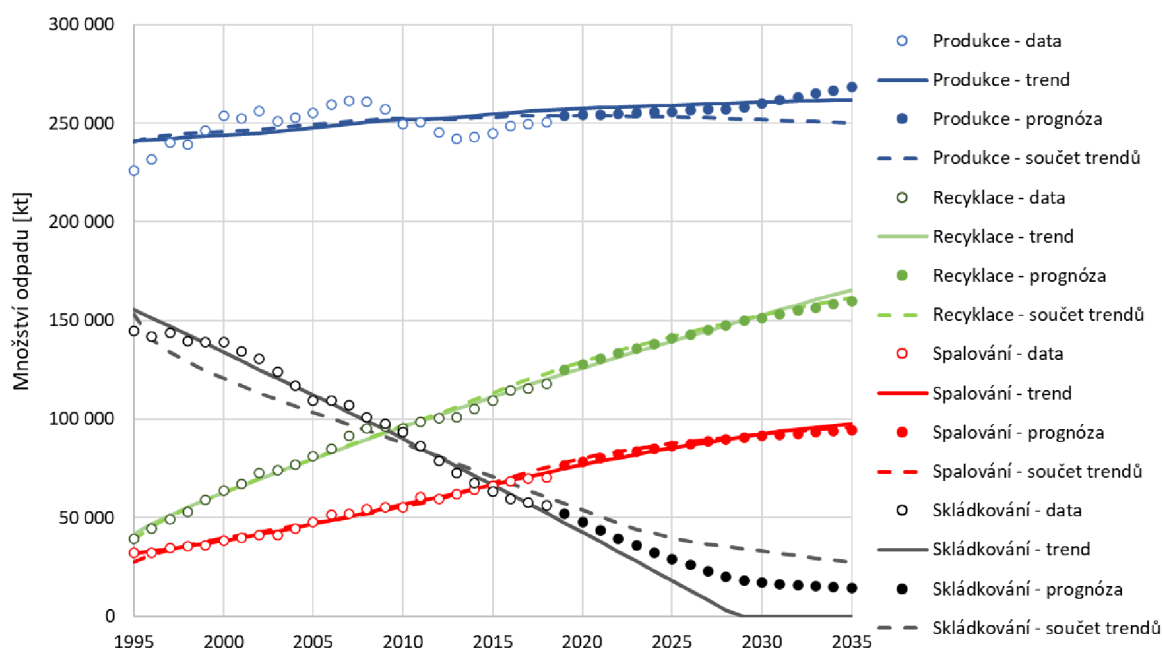
Úroveň nakládání s odpady se v jednotlivých státech EU výrazně liší, proto mají odlišnou výchozí pozici při dosahování stanovených cílů EU (obr. 1). Některé státy EU jsou již na cestě ke splnění cílů obsažených v CEP se svou současnou formou OH. V ostatních případech bude nutné zavést změny v OH, aby byly cíle CEP splněny včas. Klíčové informace o nutnosti změny poskytne prognóza produkce a nakládání s KO.



Příspěvek [A1] představil přístup pro prognózu produkce a nakládání s KO ve státech EU. Byl aplikován přístup (viz kap. 2) dle Certifikované metodiky [B5] se zachováním vazeb územního členění (státy, EU). Navíc byl model doplněn o podmínku zachování vazby mezi produkcí a nakládáním s odpady. Důvodem je předpoklad, že se všemi vyprodukovanými odpady je třeba nějakým způsobem nakládat. Rozlišeny byly tři způsoby nakládání: materiálové využití, spalování a skládkování. V posledních letech je asi 98 % spalovaného KO v EU energeticky využito. Díky prognóze nakládání s KO lze přímo posoudit plnění cílů EU. Vyrovnávání dat je založeno na metodě představené v kap. 2.3.3.

Pro provedení studie byla využita veřejně dostupná data Eurostat [C24] z období 1995–2018, predikční horizont byl uvažován do roku 2035, což je poslední rok zahrnutý v cílech CEP. Trend v historických datech o produkci odpadu byl modelován v kg na obyvatele a po provedení extrapolace byla data přepočtena na absolutní množství s využitím demografické projekce. V případě dat o nakládání s odpady byl trend modelován v absolutních hodnotách, protože tento vývoj není přímo ovlivněn počtem obyvatel ale spíše infrastrukturou a zpracovatelskou kapacitou. Výsledek prognózy ukázal očekávaný vývoj podle BAU, viz obr. 9 pro celou EU. Data o produkci oscilují kolem průměrné hodnoty, takže hodnota koeficientu determinace pro mocninnou funkci je velmi nízká, trend byl z tohoto důvodu modelován průměrem v datech přepočtených na obyvatele. Následně byla zohledněna demografická projekce pro přepočet na absolutní množství produkovaného odpadu. Údaje o spalování KO vykazují mírně exponenciální charakter. Z důvodu omezení růstu trendu nad všechny meze byl trend modelován logistickou funkcí. Detailní popis volby funkčního předpisu je k dispozici v článku [A1].

Na obr. 9 je znázorněno absolutní množství odpadu prognózovaného na úrovni EU. Trend v absolutním množství (plná čára) vstupuje do modelu vyrovnávání dat. Obr. 9 je zobrazen na úrovni EU, takže vyrovnání dat je ovlivněno i trendy nižších územních celků – států. Součet trendů na národní úrovni je znázorněn přerušovanou čarou. Výsledná prognóza po vyrovnání dat je zobrazena plnými tečkami. Je zřejmé, že výsledky vyrovnávání dat pro recyklaci a spalování KO jsou soustředěny kolem dvou trendů: na základě dat EU (trend) a na základě součtu trendů za státy EU (suma trendů). Omezení poklesu skládkování v důsledku nezápornosti musí způsobit změny v jiných časových řadách. Podle aktuálního přístupu byla v důsledku změny trendu skládkování zrychlena produkce KO. Zpomalení skládkování by mělo mít vliv spíše na jiné typy zpracování KO než na produkci. V dalším výzkumu by bylo vhodné model upravit na postupné vyrovnávání dat nebo implementovat korelace mezi časovými řadami. Výsledky prognózy pro jednotlivé státy EU jsou v publikaci [A1].



Obr. 9: Prognóza produkce a zpracování KO úroveň EU, upraveno na základě [A1]

### 3.2.2 Prognóza produkce komunálního odpadu v České republice

V České republice bylo v roce 2020 vyprodukováno 5 730 kt KO [C23]. Přestože míra materiálového využití KO v ČR roste [A1], vzhledem k cílům EU je nutné zabývat se otázkou budoucího vývoje. Množství očekávané produkce jednotlivých frakcí odpadu v následujících letech je zásadní z pohledu nastavení vhodné infrastruktury tak, aby bylo možné splnit cíle stanovené EU.

Výpočet prognózy produkce KO byl proveden na úrovni ČR, krajů a ORP s vyrovnáním trendů pro zajištění vazeb hierarchie (viz kap. 2.3.3). KO je specifický tím, že mezi jednotlivými frakcemi existují významné vazby, které by se měly v prognóze projevit. Jedná se zejména o vazbu mezi SEP a SKO. Tato vlastnost byla zohledněna ve studii [A5], kdy bylo současně prognózováno více frakcí KO. Výpočet byl proveden pro běžně separované frakce odpadu (papír, plast, sklo a bio-odpad) s vazbou na SKO. S rostoucí produkcí separovaného odpadu bylo snižováno množství dané frakce v SKO. Pro tento přístup je zásadní odhad složení SKO, čímž je určen potenciál pro možné navyšování separace. Pro případ chybějících dat byl v článku [A5] navržen odhad složení SKO pomocí regresního modelu podle typu zástavby v dané lokalitě, protože v době vzniku zmíněného článku ještě nebyly k dispozici rozbory SKO zpracované v rámci projektu TIRSMZP719 (viz kap. 1.1). Statistická analýza dat prokázala, významný vliv nového odpadového proudu množství produkovaného bio-odpadu, z tohoto důvodu nebyla vazba bio-odpadu a SKO v této studii zahrnuta. Dále bude problematika bio-odpadu řešena v kap. 3.2.3.

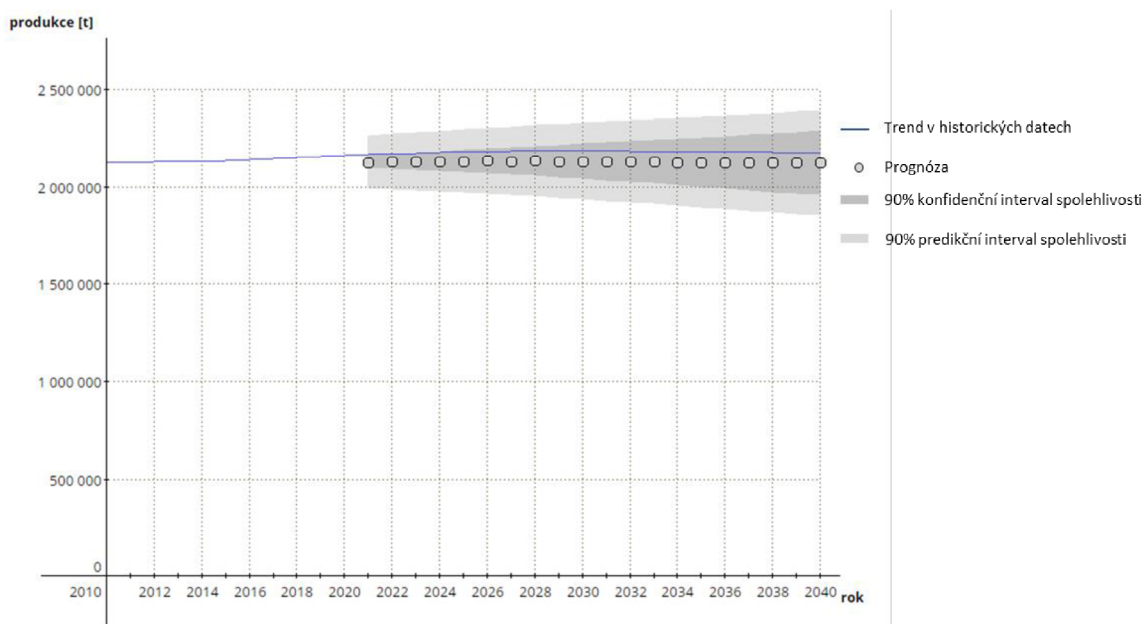
Případová studie v [A5] byla provedena na datové sadě z období 2009–2014 s výhledem na následujících 10 let. Dle této prognózy se očekává souhrnná separace papíru, plastu a skla 44,3 % v roce 2024 oproti 34,8 % v roce 2014. Výhodou této případové studie je současná prognóza složení SKO v roce 2024.

Kvalitnějších výsledků prognózy tohoto typu je možné dosáhnout pomocí přesnějších odhadů složení SKO. Touto otázkou se zabývá jedna z oblastí projektu TIRSMZP719 (kap. 1.1). Dále vlivem nových odpadových proudů lze předpokládat, že ne veškerý nově vyseparovaný odpad pochází z SKO. Nové odpadové proudy mohou být důsledkem využívání jiných materiálů, změn legislativy atd. Vliv těchto proudů na produkci byl modelován ve studii [A7]. Vazby mezi SEP a SKO byly odhadnuty pomocí modelu vyrovnávání dat, výsledkem je hodnota  $\delta_{f,j}$ , udává odhad, jaké procento nově vyseparovaného odpadu frakce  $f$  pochází z SKO na území  $j$ . Výsledky  $\delta_{f,j}$  jsou v tab. 1. Ze sledovaných frakcí separovaného odpadu (papír, plast, sklo, textil, bio-odpad a kovy) dochází podle výsledků k nejméně významnému přesunu mezi SKO a SEP v případě kovů. Nízká hodnota  $\delta_{f,j}$  značí významný vliv nových odpadových proudů na produkci dané frakce. Vysoká hodnota  $\delta_{f,j}$  znamená, že se zvyšuje separace odpadu, a to zejména přesunem odpadu z SKO do SEP. Na základě těchto výsledků lze odhadnout složení SKO v budoucnu, což je nutná vstupní informace pro projekce KO (kap. 3.3).

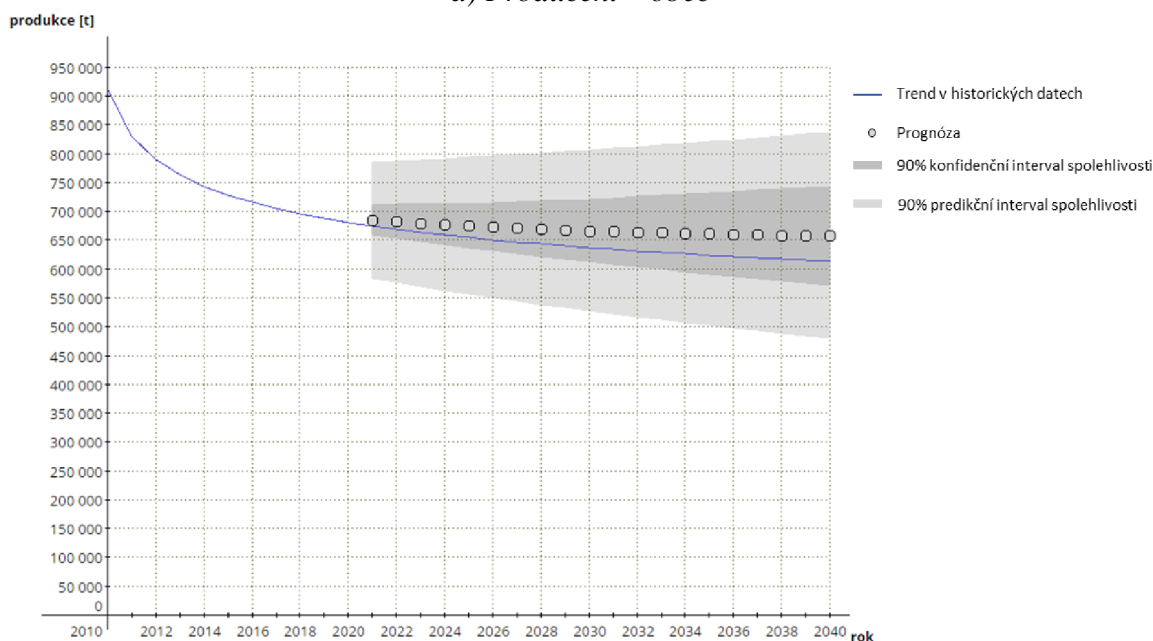
Tab. 1: Odhad přesumu odpadu mezi SEP a SKO, [A7]

	Papír	Plast	Sklo	Textil	Bio- odpad	Kovy
ČR	0.75	0.82	0.69	0.98	0.26	0.11
<b>Kraje</b>						
Vážený průměr	0.74	0.82	0.69	0.98	0.26	0.11
Vážená směrodatná odchylka	0.14	0.15	0.13	0.02	0.06	0.01
<b>ORP</b>						
Vážený průměr	0.61	0.82	0.67	0.98	0.28	0.11
Vážená směrodatná odchylka	0.26	0.20	0.26	0.04	0.20	0.07

Výpočet prognózy je zpřesňován při každém doplnění datové sady za další kalendářní rok. V současné době jsou pro prognózu využita data z období 2010–2020, viz kap. 2.2.2. Aktuální prognózy KO jsou součástí softwaru TiramisO [B6]. Pro prognózu KO byl identifikován a zahrnut vlivný faktor demografického vývoje na úrovni ČR a krajů, pro nižší územní celky nejsou demografické projekce k dispozici. Jako zdroj dat očekávaného demografického vývoje byly využity projekce obyvatelstva do roku 2070 vyhotovené ČSÚ v roce 2020 [C19]. V případě dostupných projekcí obyvatelstva i pro nižší územní celky se doporučuje demografický vývoj do prognózy zahrnout. Z důvodu výpočetní náročnosti bylo prognózováno každé kat. č. zvlášť bez definované vazby mezi kat. č. Zachována byla vazba územního členění. Níže na obr. 10 je ukázka výstupů prognózy KO, konkrétně SKO od obcí a od firem na úrovni ČR včetně intervalů spolehlivosti. Z důvodu omezeného zveřejňování dat ISOH, jsou historická data nahrazena trendem.



a) Producent – obec



b) Producent – firma

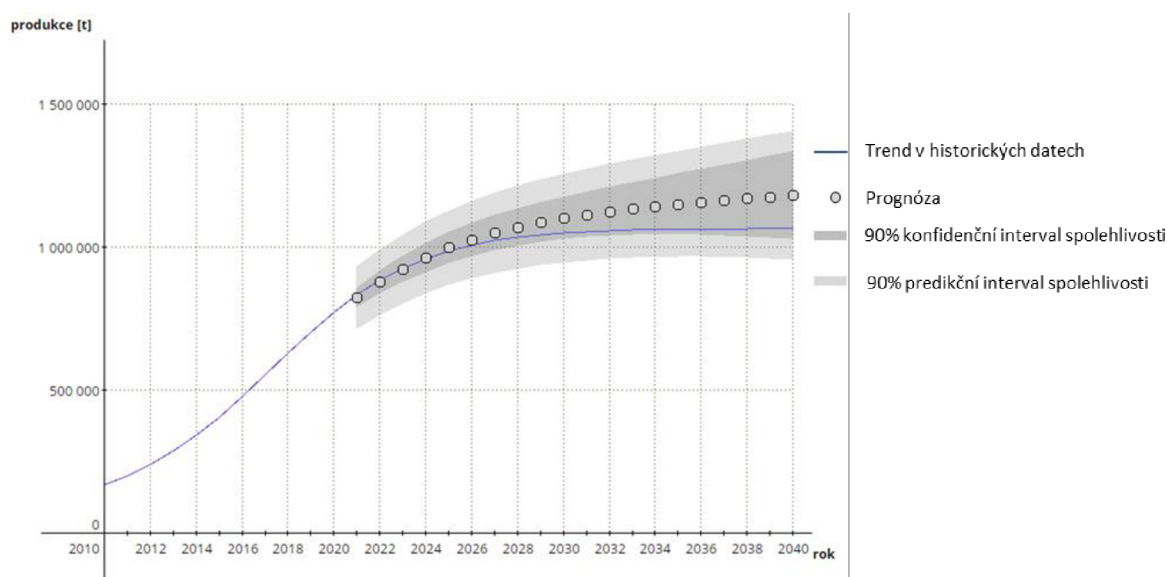
Obr. 10: Prognóza produkce SKO, úroveň ČR, zdroj: TiramisO [B6]

### 3.2.3 Prognóza produkce bio-odpadu v České republice

Bio-odpad s kat. č. 20 02 01 je z pohledu produkce specifický tím, že v minulosti došlo k legislativní změně. Od roku 2014 jsou obce dle Vyhlášky č. 321/2014 Sb. [C25] v ČR povinné umožnit občanům bio-odpad separovat, což způsobilo náhlou změnu v produkci této frakce odpadu. V případě bio-odpadu, či jiných frakcí odpadu se systematickou změnou trendu, je obtížné odhadnout budoucí produkci odpadu na základě historických dat [A6]. Klasické metody nejsou schopny taková data modelovat, pokud u všech producentů ještě neproběhla reakce na vnější zásah do systému. Přístup prezentovaný ve studii [A6] odhaduje očekávanou produkci bio-odpad na konkrétním území s využitím tzv. kolektivní informace.

Lze očekávat, že jednotlivá území reagují na změnu systému s různou efektivitou. Tohoto faktu využívá navržený přístup způsobem, že území reagující na danou situaci se zpožděním mohou přebírat informaci od těch, která již změnou prošla.

Výpočet ve studii [A6] byl proveden na datové sadě z období 2009–2017 (v době vydání zmíněné studie ještě nebyla odstraněna data v roce 2009 z důvodu krátké časové řady). Potenciál separace bio-odpadu byl dle literární rešerše stanoven na 60 kg/os. a rok pro městskou zástavbu a 200 kg/os. a rok pro venkovskou zástavbu. Na základě těchto vstupních dat se očekávalo, že většina ORP v ČR do roku 2030 dosáhne svého potenciálu separace, pro celou ČR se jedná asi o 1 390 kt/rok. Výpočet byl následně aktualizován s novou datovou sadou 2010–2020 a doplněn o vyrovnávání dat pro zachování hierarchie územního členění. Na úrovni ČR a krajů se v historických datech trend již projevil a je tedy možné jej modelovat stejným způsobem jako ostatní frakce odpadu (viz kap. 3.2.2), navíc trend na úrovni ČR od roku 2017 zpomalil svůj růst. Na úrovni ORP byl trend modelován zmíněným speciálním přístupem pro data se změnou trendu [A6]. V rámci vyrovnávání dat došlo ke korekci různých přístupů pro jednotlivé úrovně území. Výsledkem je prognóza zobrazená na obr. 11 pro ČR včetně pásů spolehlivosti.



Obr. 11: Prognóza produkce bio-odpadu, úroveň ČR, zdroj: TiramisO [B6]

Hlavním nedostatkem metody je nutnost stanovit potenciál separace, tj. množství odpadu, které je možné vyseparovat. Samotná analýza trendu není schopna vůbec reagovat u některých ORP na nastalou změnu, pokud se zatím neprojevila v historických datech. Avšak představený přístup předpokládá postupný nárůst produkce i u producentů, kteří na změnu systému doposud nereagovaly. Tato změna je inspirována vývojem ostatních producentů. Představený přístup je aplikován pouze na úrovni ORP. U vyšších úrovních (kraje a ČR) jsou trendy v datech již patrné a byly modelovány mocninnou nebo logistickou funkcí stejně jako jiné frakce odpadu (kap. 2.3.2). Díky následnému vyrovnání dat (kap. 2.3.3) se nedostatky přístupu pro ORP potlačí.

### 3.3 Projekce produkce komunálního odpadu

Pro splnění cílů EU je nutné zefektivnit materiálové využití KO, viz kap. 1, předpokladem materiálového využití je separace odpadů. Pokud do systému OH zasahují vnější vlivy (legislativní, technologický pokrok atd.) lze očekávat změnu historického trendu produkce odpadu. Proto se často přistupuje k modelování projekcí, tedy scénářů budoucího vývoje, ve vztahu ke konkrétním podmínkám zvolených autorem. Modelované scénáře jsou porovnávány s BAU za účelem simulace a hodnocení dopadu různých zásahů do systému. Dosažení cíle definovaného scénářem na úrovni státu je však výsledkem činnosti nižších územních celků, např. pro požadovanou separaci odpadů v ČR je nutné dosáhnout adekvátní separace odpadů již v domácnostech a firmách. Dopady intervencí budou tedy v rámci scénáře promítnuty na nižší územní celky až na úroveň obcí. V následujícím textu bude popsán přístup k modelování scénářů separace KO.

Množství separovaného odpadu je ve scénáři zvýšeno odkloněním separovatelných frakcí (PAP, PLA, SKL aj.) ze zbytkového odpadu (SKO, objemný odpad – ObjO) nebo produkcí nového odpadového proudu. Dále je možné do scénáře promítnout snížení produkce KO z důvodu předcházení vzniku odpadů. Východiskem pro sestavení scénáře je BAU [A1]. Scénáře separace KO jsou ovlivněny vazbou mezi produkcí separovaného a zbytkového odpadu, tyto vazby jsou analyzovány přístupem prezentovaným v článku [A7]. Začlenění těchto vazeb do konstrukce scénářů umožní lépe odhadnout potenciál pro zvýšení separace. Výsledkem modelu [A7] je odhad hodnoty, která udává, jaké procento nově separovaného množství vybrané frakce pochází z jednotlivých zbytkových frakcí (SKO, ObjO).

Jedinečnost prezentovaného přístupu je především ve využití vlastností hierarchické datové struktury, protože je potřeba zajistit provázanost procesu na státní i lokální úrovni. Modelované scénáře odrážejí názor expertů a jsou obvykle vytvořeny pro několik variant od pesimistické přes neutrální až po optimistickou. Navržený přístup k projekci separace KO se skládá ze dvou hlavních kroků. V první fázi je na státní úrovni nastaven scénář tak, aby bylo dosaženo požadovaného cíle. V navazující fázi jsou národní cíle rozděleny na regionální (obecní) úroveň. Detailní popis přístupu je k dispozici také v Certifikované metodice [B5].

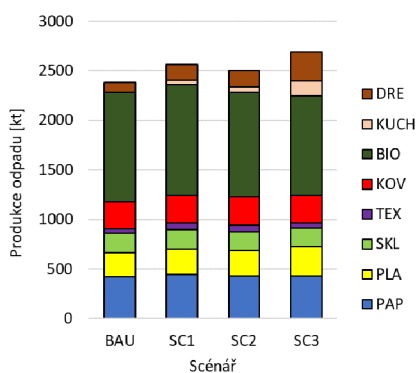
Byla provedena případová studie projekcí produkce KO v ČR pro rok 2035. BAU produkce KO byl vytvořen na základě historických dat z období 2010–2018 (viz kap. 2.2.2). Scénáře byly modelovány pro 6258 obcí ČR a pro vybrané druhy KO, které vykazují potenciál materiálového využití. Výsledky identifikovaly konkrétní obce, kde je vhodné zaměřit podporu na zvýšení separace KO. MS KO se dle BAU v roce 2035 odhaduje na 44 % za ČR s prognózou produkce KO 6 823 kt.

Hlavními kritérii pro posouzení potenciálu navýšení separace KO je současné složení zbytkového odpadu a současná MS. Nízká hodnota MS znamená velký potenciál pro zlepšení a je často spojena s vysokým množstvím SEP v SKO. Tyto obce jsou schopny více přispět k národnímu cíli. Na základě konzultace s odborníky na OH při řešení projektu TIRSMZP719, kteří se podílejí na tvorbě české legislativy [C9], byly formulovány tři scénáře separace KO: realistický (SC1), pozitivní (SC2), optimistický (SC3), viz tab. 2.

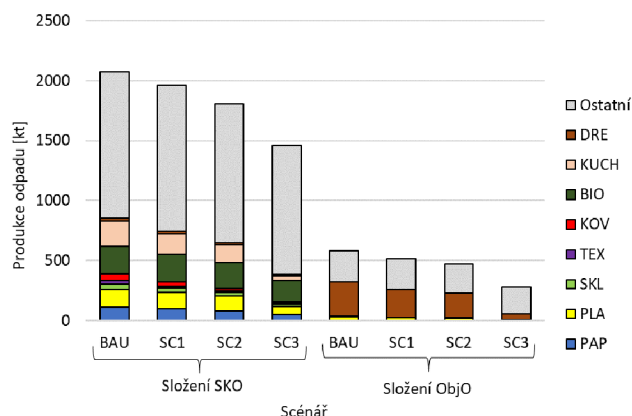
Tab. 2: Nastavení modelovaných scénářů separace KO, úroveň ČR, rok 2035

Producent Scénář	Obce				Firmy			
	BAU	SC1	SC2	SC3	BAU	SC1	SC2	SC3
Prevence [%]	0%	0%	5%	12%	0%	0%	5%	12%
MS z SKO [%]	PAP	78%	82%	84%	90%	89%	91%	95%
	PLA	62%	65%	67%	80%	13%	20%	80%
	SKL	79%	84%	86%	90%	43%	46%	90%
	TEX	65%	75%	80%	90%	50%	50%	55%
	KOV	82%	88%	93%	95%	41%	43%	85%
	BIO	84%	83%	83%	85%	74%	74%	85%
	KUCH	2%	20%	27%	80%	53%	60%	80%
DRE	83%	85%	86%	87%	82%	84%	87%	
MS z ObjO [%]	PLA	0%	20%	25%	80%	0%	25%	80%
	KOV	0%	20%	25%	80%	0%	25%	80%
	DRE	0%	20%	25%	80%	0%	25%	80%

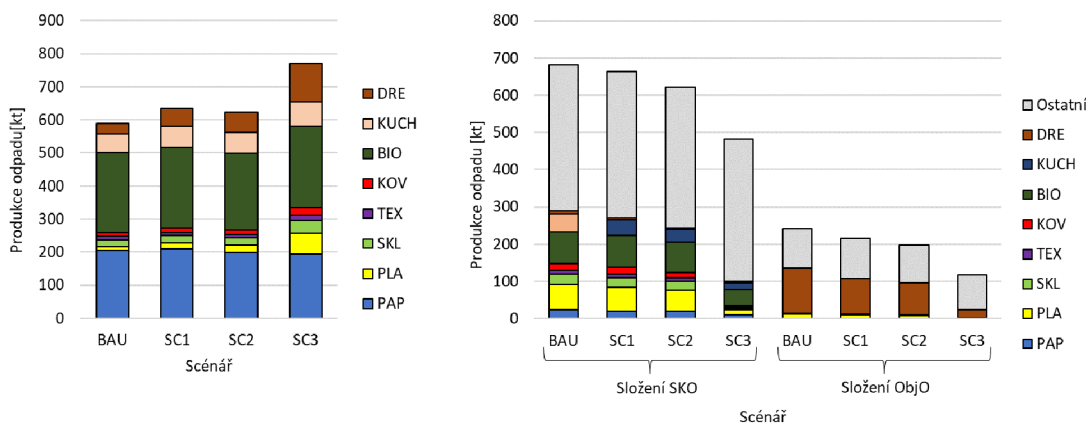
Se vstupními hodnotami uvedenými v tab. 2 a informací o složení odpadu [B12] byly scénáře modelovány nejprve na úrovni státu a poté pro obce v ČR. Graficky je složení separovaného odpadu a zbytkového odpadu znázorněno na obr. 12. První sloupec na obr. 12 vždy znázorňuje BAU a následují modelované scénáře. Ve scénářích je vyšší produkce separovaných frakcí, ačkoli je celková produkce v SC2 a SC3 korigována prevencí před vznikem KO. Podle BAU je v SKO již více než polovina neseparovatelného odpadu („Ostatní“), tento odpad nelze omezit separací z SKO. Scénáře ukazují, že některé frakce mají větší potenciál pro navýšení separace než jiné. Lze zmínit bio-odpad z kuchyní v SKO, který v případě odpadu z obcí zaujímá významnou část SKO.



a) Separovaný odpad z obcí



b) Zbytkový odpad z obcí



c) Separovaný odpad z firem

d) Zbytkový odpad z firem

Obr. 12: Výsledky modelování scénáře, úroveň ČR, rok 2035

Hodnocení BAU pomůže vybrat konkrétní obce, kam je vhodné zaměřit podporu na zvýšení separace KO. Nutné podotknout, že výpočet vychází z odhadu složení SKO [A8]. Namodelované scénáře umožňují zacílit konkrétní zásahy do OH za účelem dosažení stanoveného cíle na národní úrovni. Rozhodující je MS v dané obci a zároveň velikost producenta, protože větší producent může cílením OH efektivněji přispět k naplnění národních cílů. Studie je podkladem pro rozhodování v plánování OH. Prognóza podle BAU totiž ukazuje, že současná legislativa nemusí být dostatečná pro naplnění cílů CEP. Prezentovaný přístup umožňuje opakované modelování budoucího vývoje a slouží jako sofistikovaná podpora plánování ve OH.

Kvalitu scénáře výrazně ovlivňuje odhad potenciálu v obcích. Je proto nezbytné mít odpovídající odhad složení zbytkového odpadu a odhad přesunu odpadu mezi frakcemi. Obecně jsou tyto parametry závislé na lokálních podmínkách, a proto je vhodné je vyhodnocovat individuálně pro každou obec. V případové studii došlo ke zjednodušení, s ohledem na nedostatek dat bylo u každé obce uvažováno stejné složení zbytkového odpadu a přesun odpadu mezi frakcemi. Navazující vývoj by měl být zaměřen především na zlepšení kvality vstupních dat.



## 4 MODELY VYUŽÍVAJÍCÍ PROGNÓZY PRODUKCE ODPADU

Stávající systémy OH v zemích EU jsou upravovány tak, aby odpovídaly příslušným milníkům (kap. 1). Cílem je vytvořit systém OH, který je udržitelný z ekonomického i ekologického hlediska. OH je velmi komplexní obor, ve kterém se lze při plánování setkat s mnoha úkoly a problémy. Každá úloha řešená v OH je svou povahou jedinečná a vyžaduje specifická vstupní data lišící se především časovým nebo územním detailem. Strategické plány modernizace a výstavby infrastruktury sběru a zpracování odpadů vyžadují jako primární zdroj dat informace o produkci a složení odpadů, včetně jejich předpokládaného vývoje. Pro plánování v oblasti OH jsou na ÚPI dlouhodobě vyvíjeny podpůrné modely a nástroje. Autorka této dizertační práce se podílela na konkrétních studiích, kde se využívaly výsledky prognóz a projekcí. V této kapitole jsou představeny vybrané publikace.

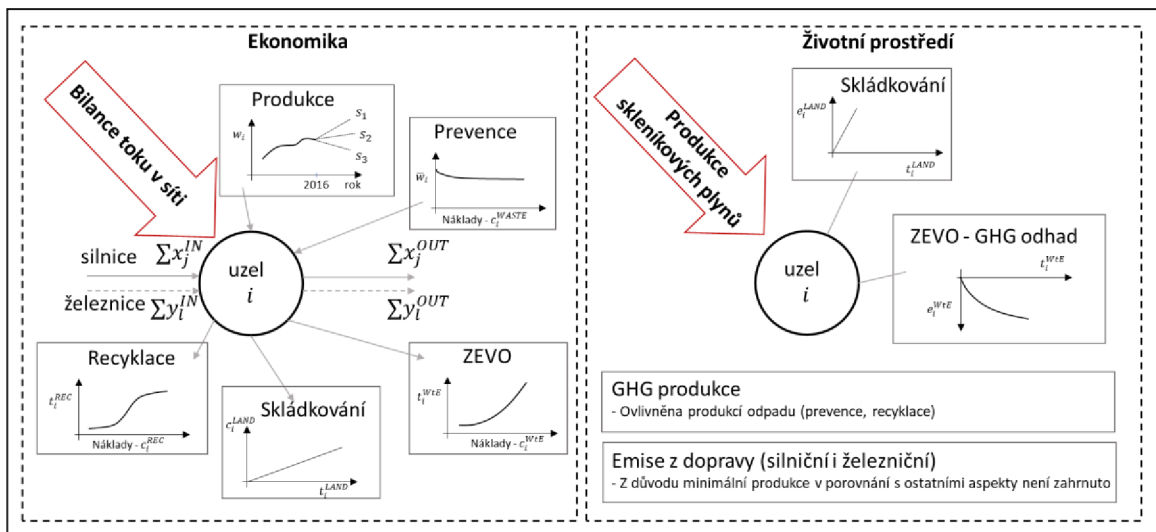
Článek [A10] představil model pro nakládání s KO na základě strategií. Cílem je snížit produkci KO, co nejvyšší možnou měrou KO recyklovat a zbytkový KO energeticky využít. Systém byl modelován pomocí smíšeného celočíselného lineárního programování zohledněním dvou kritérií – hodnocení skleníkových plynů (GHG – greengouse gas) a minimalizace nákladů (viz obr. 13). Ekonomická udržitelnost nových projektů je zásadním aspektem pro skutečně realizované projekty. Motivace založená pouze na ekonomické ziskovosti má omezené možnosti pro efektivnější nakládání s KO. Vzhledem k tomu, že existuje vazba na životní prostředí a kvalitu života, je potřeba státní intervence na podporu materiálového a energetického využití.

Funkční závislosti z obr. 13 byly odhadnuty na základě reálných dat. Navrhované nelineární funkce cen a reklamy jsou nahrazeny po částech lineární aproximací, aby se snížila výpočetní náročnost. Jednou ze zásadních vstupních informací je produkce KO (obr. 13), matematický model navíc uvažuje náhodnost v produkci odpadu. Produkce KO může být dle principů modelu redukována prevencí před vznikem odpadu. Navržený postup předpokládá možnost ovlivnění produkce odpadů investicí do osvěty. Reálná data o produkci odpadu byla modelována nelineární regresí s využitím S-křivky v podobě logistické funkce:

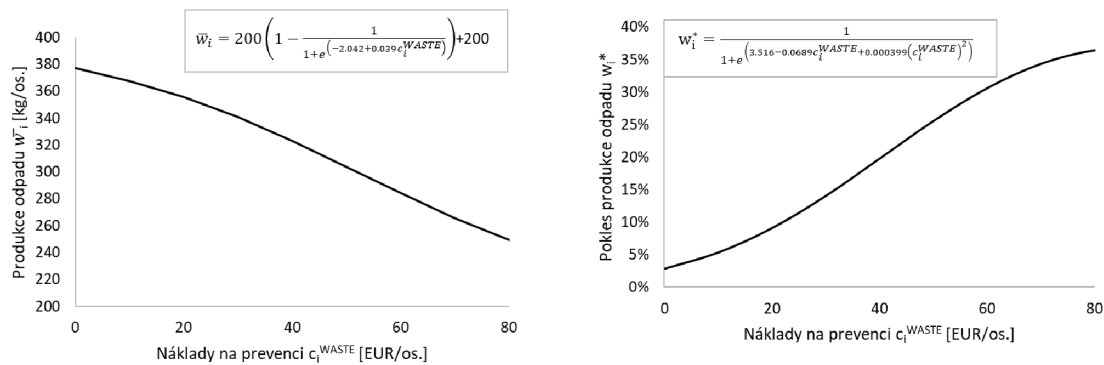
$$\bar{w}_i(c_i^{WASTE}) = (w_{max} - w_{min}) \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-(a+bc_i^{WASTE})}} \right) + w_{min}. \quad (7)$$

kde  $\bar{w}_i$  značí odhad produkce odpadu v závislosti na investici do prevence před vznikem odpadu  $c_i^{WASTE}$  v lokalitě  $i$ . Hledané regresní parametry jsou označeny  $a$  a  $b$ . Hodnoty  $w_{min}$  a  $w_{max}$  udávají minimální a maximální možnou produkci sledovaných frakcí KO, což je nutná informace pro využití modelu S-křivky.

Případová studie vycházela z dat o produkci odpadu v roce 2015 v ČR, jednalo se o nejnovější dostupná data v době vydání článku [A10]. Závislost popisující produkci odpadu je popsána v obr. 14 včetně tvaru regresních funkcí, odhad  $w_{min}$  resp.  $w_{max}$  byl stanoven na 200 kg/os. resp. 400 kg/os., což odpovídá nejlepším a nejhorším regionům při uplatňování prevence před vznikem KO. Podobná situace byla pozorována také v Rakousku, viz [C26]. Dále byla zohledněna prognóza produkce vybraných frakcí KO v roce 2024. Závislosti pro odhad recyklace odpadu, skládkování a spalování v ZEVO byly modelovány také na základě dat z roku 2015 s využitím vhodných regresních funkcí, detaily jsou popsány v příspěvku [A10]. Výsledky případové studie mimo jiné poukázaly na potenciál v předcházení vzniku odpadu. Představený model [A10] je určený pro vytvoření podkladů při rozhodování o nakládání s KO.



Obr. 13: Schéma systému nakládání s odpadem skládajícího se z ekonomické a environmentální složky, upraveno na základě [A10]



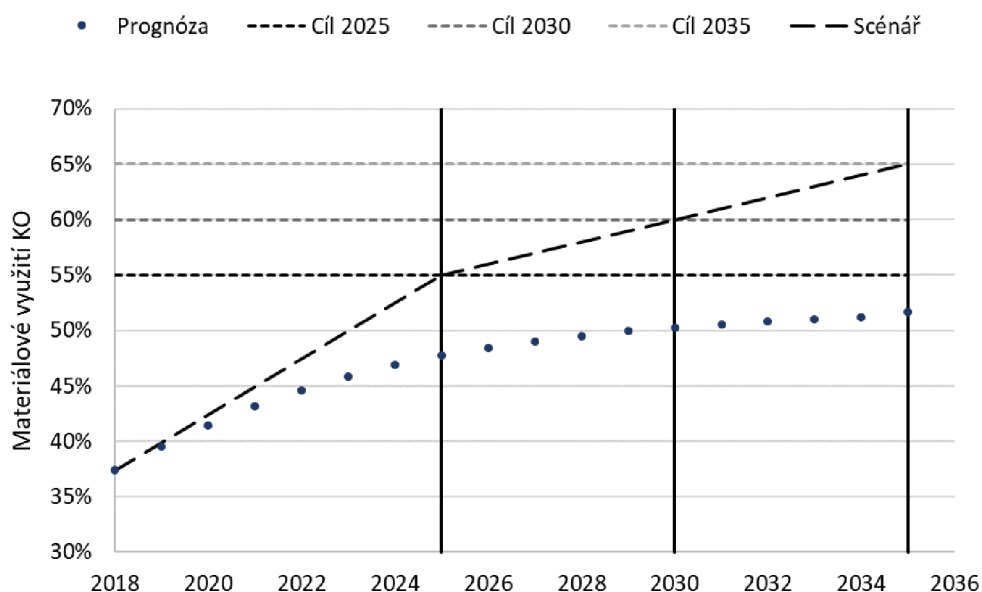
a) Závislost produkce odpadu na investici do prevence

b) Závislost poklesu produkce odpadu na investici do prevence

Obr. 14: Vliv investice do prevence před vznikem odpadu na produkci, upraveno na základě [A10]

Dosažení ambiciózních cílů zahrnutých v CEP je náročným úkolem, zejména pro členské státy EU s méně rozvinutými systémy nakládání s odpady. Pro řešení takového problému byl navržen přístup využívající vícestupňové stochastické programování [A11]. Představený model zohledňuje aktuální míru materiálového využití, přičemž nejistá produkce odpadu je předpovídána možnými scénáři. Model umožňuje sekvenční rozhodování a posuzování různých strategií různých budoucích scénářů pro konkrétní roky, lokality, technologie a kapacity infrastruktury zpracování odpadů.

Využití modelu a jeho výpočetní náročnost jsou představeny v článku [A11] na případové studii ČR. Cílem úlohy je vybrat optimální umístění a velikosti zařízení na zpracování odpadů ve vybraných městech. Uvažují se dva typy zařízení: ZEVO, kde se odpad spaluje za účelem výroby tepla a elektřiny, a zařízení na mechanickou biologickou úpravu (MBÚ), kde se KO třídí a poté buď zpracovává anaerobní digescí, nebo se ukládá na skládku. Účelová funkce je čistě ekonomická a minimalizuje očekávané náklady celého systému nakládání s odpady v uvažovaném časovém období (náklady na přepravu, poplatky na bráně v ZEVO a zařízení MBÚ, penalizace za nevyužitou kapacitu a poplatky za skládkování). Model funguje na principu zachování hmoty, tedy odpad vyprodukovaný v konkrétním městě nebo přepravený do tohoto města je buď odvezen, nebo zde zpracován. Současně jsou zahrnuta omezení pro plnění cílů EU. Zásadní informací pro aplikaci modelu je materiálové využití KO, protože přímo ovlivňuje množství KO, které bude určeno ke zpracování v ZEVO a MBÚ. Na obr. 15 je znázorněna prognóza materiálového využití KO podle BAU a současně scénář, který vede ke splnění recyklačních cílů EU. Nejistota v podobě produkce odpadů s materiálovým využitím byla modelována pro tři scénáře (1. scénář – BAU; 2. scénář – splnění cílů EU s 5letým zpožděním; 3. scénář – včasné splnění cílů EU). Všechny scénáře byly dále rozvětveny, aby zachytily možný budoucí vývoj. Výsledkem modelu je návrh výstavby nových zařízení a jejich kapacit, aby bylo možné plnit cíle EU. Síla modelu spočívá v tom, že jej lze použít pro plánování tzv. rolling-horizon, což znamená, že jej lze po několika letech znovu přepočítat a aktualizovat nadcházející rozhodnutí o nově dostupná data.



Obr. 15: Prognóza materiálového využití KO v ČR a scénář pro splnění cílů EU, historická data 2010–2017, upraveno na základě [A11]

**Shrnutí:** Prognózy produkce odpadu mají zásadní význam při plánování OH. Jedná se o vstupní data pro různé aplikace vedoucí ke změnám legislativy, strategickému plánování infrastruktury, nebo operativnímu řízení systému (viz [A4]). Konkrétní podoba prognózy by měla zohledňovat následující využití výsledků z pohledu územního detailu, časového detailu, délky prognózy, frakce odpadu atd. Kvalita prognózy může významně ovlivnit navazující modely a plány v OH, proto by měly být zohledněny všechny kroky prognózy definované v kap. 2.

## 5 ZÁVĚR

Modely budoucí produkce různých frakcí odpadu jsou zásadní vstupní informací pro plánování v oblasti OH. Vybudování vhodné infrastruktury OH s dostatečnou kapacitou a splnění cílů EU je podmíněno kvalitními odhady produkce odpadu. Pro členské země EU byl představen tzv. European Reference Model on Municipal Waste Management, který preferoval co nejvíce zahrnout modely produkce odpadů, které byly vytvořeny samotnými členskými státy. Motivace pro vznik této práce vycházela ze skutečnosti, že nebyl k dispozici jednotný přístup pro prognózování produkce odpadu v ČR.

Pro prognózování produkce odpadu, se využívají různé modelovací přístupy z oblasti statistického zpracování dat, optimalizace, metod strojového učení atd. Jejich volba závisí především na charakteru vstupních dat a požadovaném detailu prognózy. Velmi častým nedostatkem představených modelů je minimální pozornost věnovaná přípravě a pre-processingu dat. Ve většině prostudovaných příspěvků jsou tyto fáze modelování zahrnuty pouze okrajově, nebo jsou zcela opomenuté. Dalším zásadním problémem dosavadních přístupů je chybějící informace o nejistotě prognózy např. v podobě pásů spolehlivosti. V návaznosti na výše uvedené poznatky byl navržen přístup k prognózování produkce odpadů, který se skládá celkem ze 13 kroků rozdělených na přípravu dat, pre-processing, processing a post-processing. Prognóza je poté výsledkem všech těchto na sebe navazujících kroků. Současně s touto prací byl řešen projekt TIRSMZP719 [B3], na jehož řešení se autorka významně podílela. V rámci řešení projektu TIRSMZP719 vznikla Certifikovaná metodika pro provádění dlouhodobé prognózy produkce odpadů v ČR včetně revize prognózy [B5], podoba této metodiky byla průběžně korigována zástupci MŽP s ohledem na její následující využití.

Data o produkci odpadu v ČR jsou shromažďována v každoročním hlášení o produkci a nakládání s odpady dle Zákona o odpadech [C9]. V současnosti je k dispozici datová sada z období 2009–2020. Vzhledem k charakteru těchto dat byl pro prognózování odpadu v ČR zvolen přístup založený na modelování trendu v historických datech s následnou bilancí pro zachování hierarchické struktury. Prognóza dle metodiky [B5] byla implementována v softwaru TiramisO, jehož hlavním uživatelem je MŽP. TiramisO poskytuje prognózy všech kat. č. odpadů do roku 2040 na úrovni ORP, krajů a ČR. Principy uvedené v metodice [B5] jsou však obecně platné a jejich využitím je možné docílit kvalitní prognózy také ve větším detailu územního nebo časového členění, pokud má uživatel k dispozici potřebná historická data, viz metodika [B5].

V navazující činnosti budou řešeny primárně následující body:

- Prognóza produkce odpadu v ČR bude řešena na úrovni obcí. U obecních dat se očekává větší variabilita v historických datech, může být tedy vhodné přizpůsobit kritické meze v rámci pre-processingu. Navíc jsou obecní data specifická poměrně častým výskytem chybějících záznamů o produkci. Bude nutné vyřešit otázku, zda se jedná o nulovou produkci odpadu nebo o chybějící hodnotu, což může mít zásadní vliv na podobu trendu v datech.
- Prognóza produkce odpadu v ČR bude dále doplněna o prognózu nakládání s odpady. Prvotní aplikace metodiky, kde byla produkce odpadu provázána s jeho zpracováním, byla na úrovni států EU (viz kap. 3.2.1). U časových řad o nakládání s odpady se také častěji vyskytují skokové změny trendu, které souvisejí s realizací

nového zpracovatelského zařízení. Bude tedy nutné věnovat pozornost zejména pre-processingu dat. V případě zohlednění nakládání s odpady ve větším územním detailu je nutné upravit vstupní historická data také s ohledem na transport odpadu mezi územními celky a nesoulad mezi produkcí a nakládáním s odpady v evidovaných datech, viz [A12].

- S ohledem na prognózu nakládání s odpady bude analyzován vliv demografického vývoje a dalších vlivných faktorů na konkrétní metody zpracování odpadu. Kromě toho může být výhodné zohlednit korelace mezi různými metodami nakládání s odpady a produkcí pro model vyrovnávání dat.
- Konstrukce intervalů spolehlivosti prognózy by měla zohlednit rozptyl reziduí v závislosti na čase. Aktuálně nebyl nalezen vhodný přístup, který by umožnil získat tuto informaci z dostupných dat.
- Pro využití v plánování infrastruktury OH v ČR budou formulovány konkrétní scénáře produkce KO v závislosti na konkrétních změnách systému, např. změna balení potravin, pytlový sběr odpadu, platby za zpracování odpadu dle vyprodukovaného množství atd.

Přístup k prognózování produkce odpadu by měl být průběžně aktualizován v reakci na změny v systému OH.

## REFERENCE

A – Publikace autora citované v práci

- [A1] SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; PLUSKAL, J.; RYBOVÁ, K. Hierarchical optimisation model for waste management forecasting. *Optimization and Engineering*, 2022. doi:10.1007/s11081-022-09735-2.
- [A2] SMEJKALOVÁ, Veronika Aproximace prostorově distribuovaných hierarchicky strukturovaných dat: diplomová práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Matematiky, 2018. 76 s. Vedoucí práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [A3] PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; NEVRLÝ, V.; ZAVÍRALOVÁ, L.; KŮDELA, J.; POPELA, P. Spatially distributed generation data for supply chain models – Forecasting with hazardous waste. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161, 1317-1328. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.107.
- [A4] ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; SZÁSZIOVÁ, L.; NEVRLÝ, V.; HRABEC, D.; PAVLAS, M. Review on waste generation modeling and forecasting methods. *Sustainable Cities and Society*, 2022. Under review.
- [A5] PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; STEHLÍK, P. Municipal solid waste fractions and their source separation: Forecasting for large geographical area and its subregions. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11 (2), 725-742. DOI: 10.1007/s12649-019-00764-0.
- [A6] SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; BURCIN, B.; KUČERA, T. Trend forecasting for waste generation with structural break. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266, 121814. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121814.
- [A7] ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; KŮDELA, J. Mixed-integer quadratic optimization for waste flow quantification. *Optimization and Engineering*, 2022. Under review.
- [A8] ŠRAMKOVÁ, K.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; JIRÁSEK, P.; SMEJKALOVÁ, V.; POPELA, P. Stratification and multi-representative optimization approach to waste composition analysis. *Optimization and Engineering*, 2021, 22 (3), 1727-1754. DOI:10.1007/s11081-021-09645-9.
- [A9] SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; RYBOVÁ, K.; NEVRLÝ, V.; ROSECKÝ, M.; BURCIN, B.; KUČERA, T. Waste Production and Treatment Modelling for EU Member States. *Chemical Engineering Transactions*, 2020, 81, 691-696. DOI: 10.3303/CET2081116.
- [A10] ŠOMPLÁK, R.; KŮDELA, J.; SMEJKALOVÁ, V.; NEVRLÝ, V.; PAVLAS, M.; HRABEC, D. Pricing and advertising strategies in conceptual waste management planning. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239, 118068. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118068.

- [A11] KŮDELA, J.; SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V. Legislation-induced planning of waste processing infrastructure: A case study of the Czech Republic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132, 110058. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110058.
- [A12] ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; SMEJKALOVÁ, V.; ŠMÍDOVÁ, Z.; PAVLAS, M. Bulky waste for energy recovery: Analysis of spatial distribution. *Energy*, 2019, 181, 827-839. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.175.
- [A13] SMEJKALOVÁ, V.; ŠOMPLÁK, R.; NEVRLÝ, V.; HOLEC, T. Forecasting of waste production data with changes in credibility and trend. *Chemical Engineering Transactions*, 2019, 76, 1243-1248. DOI: 10.3303/CET1976208

#### B – Projekty a výstupy projektů

- [B1] OPŽP. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014–2020. 2015. Operační program Životní prostředí. Cit. 1.6.2022. Dostupné z: <https://www.opzp.cz/>
- [B2] 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/>
- [B3] TIRSMZP719. Prongózování produkce odpadů a stanovení složení komunálního odpadu), doba řešení 1.1.2019 – 30.6.2022. TAČR
- [B4] CEVOOH. Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost. SS02030008. TAČR. Doba řešení. 1.1.2021 – 31.12.2026
- [B5] ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; SZÁSZIOVÁ, L.; ŠRAMKOVÁ, K.; KŮDELA, J.; ERYGANOV, I.; BOUDA, Z.; SUZOVÁ, J.; POPELA, P.; PAVLAS, M. Certifikovaná metodika pro provádění dlouhodobé prognózy produkce odpadů v ČR včetně revize prognózy (Výsledek V9). 2021. TIRSMZP719 Produkt byl předán uživateli výsledku: Ministerstvo životního prostředí.
- [B6] TiramisO. Prognóza produkce odpadů. Pavlas, M., Šomplák, R., Roupec, J., Talpa, J., Smejkalová V. TIRSMZP719
- [B7] PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; KŮDELA, J.; POPELA, P. Výzkumná zpráva popisující přístup k řešení prognózování produkce odpadů v mezinárodním měřítku (Výsledek V5). TIRSMZP719, 2019.
- [B8] PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; BOUDA, Z.; SUZOVÁ, J.; ROUPEC, J.; SZÁSZIOVÁ, L.; POPELA, P.; KŮDELA, J. Výzkumná zpráva popisující výběr vhodných metod datové analýzy a matematického modelování prognózy produkce odpadů (Výsledek V6). TIRSMZP719, 2019.



- [B9] ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; POPELA, P.; KŮDELA, J.; ERYGANOV, I.; ŠRAMKOVÁ, K.; PAVLAS, M. Výzkumná zpráva popisující princip a matematický model prognózování produkce odpadů (Výsledek V7). TIRSMZP719, 2020.
- [B10] ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; POPELA, P.; KŮDELA, J.; ERYGANOV, I.; ŠRAMKOVÁ, K.; PLUSKAL, J.; PAVLAS, M. Souhrnná komplexní výzkumná zpráva popisující nastavení a řešení zpracování dlouhodobé prognózy produkce odpadů v ČR (Výsledek V8). TIRSMZP719, 2021.
- [B11] ŠOMPLÁK, R.; SMEJKALOVÁ, V.; ROSECKÝ, M.; SZÁSZIOVÁ, L.; ŠRAMKOVÁ, K.; KŮDELA, J.; ERYGANOV, I.; BOUDA, Z.; SUZOVÁ, J.; POPELA, P.; PAVLAS, M.: V9 TIRSMZP719; Certifikovaná metodika pro provádění dlouhodobé prognózy produkce odpadů v ČR včetně revize prognózy (Výsledek V9) – PŘÍLOHY. Produkt byl předán uživateli výsledku: Ministerstvo životního prostředí.
- [B12] VEVERKA, Z.; PAVLAS, M.; GREGOR, J.; KROPÁČ, J.; BOUDA, Z.; SUZOVÁ, J.: V4 TIRSMZP719; Metodika pro stanovení složení směšného komunálního odpadu z obcí a komunálního odpadu. Produkt byl předán uživateli výsledku: Ministerstvo životního prostředí.

#### C – Literatura ostatní

- [C1] MORSELETTO, P. Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 153, 104553. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553.
- [C2] GAI, L.; VARBANOV, P. S.; FAN, Y. V.; KLEMEŠ, J. J.; ROMANENKO, S. V. Trade-offs between the recovery, exergy demand and economy in the recycling of multiple resources. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167, 105428. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105428.
- [C3] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives (Text with EEA relevance). *Official Journal L 312*, 2018, p. 3-30. [cit. 2020-06-23].
- [C4] Directive EU 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste (Text with EEA relevance). *Official Journal L 150*, 2018, p. 100-108. [cit. 2020-06-23].
- [C5] Directive EU 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance). *Official Journal L 150*, 2018, p. 109-140. [cit. 2020-06-23].
- [C6] Directive EU 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste (Text with EEA relevance). *Official Journal L 150*, 2018, p. 141-154. [cit. 2020-06-23].
- [C7] Eurostat. European Statistical Office. Cit. 30.5.2022. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/>

- [C8] Informační systém odpadového hospodářství ISOH. CENIA, česká informační agentura životního prostředí [online]. CENIA, česká informační agentura životního prostředí, c 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.cenia.cz/odpadove-a-obehove-hospodarstvi/isoh/>
- [C9] Zákon č. 541/2020 Sb. O odpadech. Cit. 20.5.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>.
- [C10] VEJNAR, P. a kol. Matematické vyjádření výpočtu „soustavy indikátorů OH“ v souladu s vyhláškou č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, v platném znění, 2019 [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://www.inisoft.cz/uploads/media/default/0001/03/c29f066488e9ca772efa8fbaec6dd18658a93a8d.pdf>
- [C11] 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>.
- [C12] ROSECKÝ, M.; ŠOMPLÁK, R.; SLAVÍK, J.; KALINA, J.; BULKOVÁ, G.; BEDNÁŘ J. Predictive modelling as a tool for effective municipal waste management policy at different territorial levels. *Journal of Environmental Management*, 2021, 291, 112584. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112584.
- [C13] KANNANGARA, M.; DUA, T.; AHMADI, L.; BENSEBAA, F. Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches. *Waste Management*, 2018, 74, 3-15. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.11.057.
- [C14] BLÁZQUEZ-GARCÍA, A.; CONDE, A.; MORI, U.; LOZANO, J.A. A review on outlier/anomaly detection in time series data. *ArXiv*, 2020, arXiv:2002.04236. DOI: 10.48550/arXiv.2002.04236.
- [C15] ADELEKE, O.; AKINLABI, S.A.; JEN, T.-C.; DUNMADE, I. Prediction of municipal solid waste generation: an investigation of the effect of clustering techniques and parameters on ANFIS model performance. *Environmental Technology*, 2020, 43 (11), 1634–1647. DOI: 10.1080/09593330.2020.1845819.
- [C16] KALINA, J.; HŘEBÍČEK, J.; BULKOVÁ, G. Case study: Prognostic model of Czech municipal waste generation and treatment. *Proceedings – 7th International Congress on Environmental Modelling and Software: Bold Visions for Environmental Modeling (iEMSs)*, 2014, 2, 932-939.
- [C17] Prognóza ČNB – jaro 2022. ČNB - Česká národní banka [online]. Copyright c ČNB 2022 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/>
- [C18] BLEHA, B.; BURCIN, B.; KUČERA, T.; ŠPROCHA, B.; VAŇO, B. The population prospects of Czechia and Slovakia until 2060. *Demografie*, 2018, 60 (3), 219-233.
- [C19] Projekce obyvatelstva v krajích ČR – do roku 2070. Český statistický úřad [online]. Copyright c ČSÚ 2022 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/projekce-obyvatelstva-v-krajich-cr-do-roku-2070>.

- [C20] MENA-NIETO, A.; ESTAY-OSSANDON, C.; DOS SANTOS S.P. Will the Balearics and the Canary Islands meet the European Union targets for municipal waste? A comparative study from 2000 to 2035. *Science of the Total Environment*, 2021, 783, 147081. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147081.
- [C21] CHEN, D. M.; BODIRSKY, B. L.; KRUEGER, T.; MISHRA, A.; POPP, A. The world's growing municipal solid waste: Trends and impacts. *Environmental Research Letters*, 2020, 15 (7). DOI: 10.1088/1748-9326/ab8659.
- [C22] DE WEERDTA, L.; SASAOC, T.; COMPERNOLLEB, T.; VAN PASSELA, S.; DE JAEGERD, S. The effect of waste incineration taxation on industrial plastic waste generation: A panel analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, 157, 104717. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104717.
- [C23] Veřejné informace o produkci a nakládání s odpady. Ministerstvo životního prostředí [online]. INISOFT, s.r.o., c 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://isoh.mzp.cz/visoh>.
- [C24] Eurostat - European statistical office [online]. Copyright c Eurostat 2022 [cit. 12.09.2021]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat>.
- [C25] Vyhláška č. 321/2014 Sb. Vyhláška o rozsahu a způsobu zajištění odděleného soustředování složek komunálních odpadů. Cit. 20.5.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-321>
- [C26] LEBERSORGER, S.; BEIGL, P. Municipal solid waste generation in municipalities: Quantifying impacts of household structure, commercial waste and domestic fuel. *Waste Management*, 2011, 31 (9-10), 1907-1915. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.05.016.