



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# STANOVENÍ UHLÍKOVÉ STOPY RŮZNÝCH TECHNIK ZPRACOVÁNÍ ODPADU

DETERMINATION OF THE CARBON FOOTPRINT OF DIFFERENT WASTE TREATMENT TECHNIQUES

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Suchomel

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Klaudia Köbölová

BRNO 2022



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Ondřej Suchomel</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenství
Vedoucí práce:	<b>Ing. et Ing. Klaudia Kőbőlová</b>
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Stanovení uhlíkové stopy různých technik zpracování odpadu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přijetím evropské zelené dohody v roce 2019 a akčního plánu EU pro oběhové hospodářství v roce 2020 se Evropská unie zavázala dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050. Jedním z nejdiskutovanějších témat je různé nakládání s odpady. Dostupné provozní a experimentální metody se značně liší svými dopady na klima. Systém nakládání s odpady je založen na správné recyklaci a následném zpracování odpadů. Práce bude zaměřena na dohledání moderních metod nakládání s odpady a porovnání jejich uhlíkové stopy. Součástí práce bude také vytvoření modelového příkladu pro konkrétní město a určení, která varianta souboru technik nakládání s odpady bude mít vzhledem k množství vyprodukovaného odpadu nejmenší dopad na klima.

### Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat přehled problematiky odpadového hospodářství.
2. Popsat základní i moderní techniky využívané pro nakládání s odpady a vypočítat jejich uhlíkovou stopu.
3. Pro vybrané město navrhnout způsob nakládání s odpady na základě vypracované rešerše.

### Seznam doporučené literatury:

ROGOFF, Marc Jay a Francois SCREVE. Waste-to-energy: technologies and project implementation. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2011, 166 stran : ilustrace. ISBN 978-1-4377-7871-7.

KLINGHOFFER, Naomi B a Marco J. CASTALDI. Waste to energy conversion technology. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, xxi, 234 s. : il. ISBN 978-0-85709-011-9.

Waste Management Plan of the Czech Republic for 2015-2024, Ministerstvo životního prostředí.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá problematikou zpracování odpadů, odpadového hospodářství a uhlíkovou stopou. Cílem práce je pochopit komplexní problematiku těchto odvětví a na základě provedené rešerše vytvořit návrh pro město Brno. První teoretická část se zabývá objasněním výhod oběhového hospodářství a analýzou odpadů v ČR. Další část vystihuje výhody a nevýhody uhlíkové stopy a je zde popsán její výpočet. Poslední dvě teoretické části rozebírají možnosti a metody zpracování odpadů jak konvenčními, tak moderními postupy. Poslední část této práce je návrhově výpočetní a zabývá se návrhem zpracování odpadů pro město Brno. Konkrétně práce řeší výhody a nevýhody mezi kompostováním a anaerobní digestí pro zpracování bioodpadu. Na základě výpočtů byl stanoven závěr o reálném využití těchto technologií.

## **Klíčová slova**

odpadové hospodářství, uhlíková stopa, zpracování odpadu, emisní faktory

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis focuses on the issue of waste treatment, waste management and carbon footprint. The aim of this thesis is to understand the complexity of these industries and propose a plan for the city of Brno based on the research done. The first theoretical part explains the benefits of circular economy and waste analysis in Czech Republic. The ensuing part describes the process of carbon footprint calculation and presents its advantages and disadvantages of carbon footprint. The two following theoretical sections discuss the methods and possibilities of waste treatment by conventional and modern methods. Last part of this thesis is a computational design and offers a waste processing proposal for the city of Brno. This thesis predominantly addresses the advantages and disadvantages of composting and anaerobic digestion for biowaste processing. A practical use of these technologies has been proposed based on the calculations.

## **Key words**

waste management, carbon footprint, waste processing, emission factors

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SUCHOMEL, Ondřej. *Stanovení uhlíkové stopy různých technik zpracování odpadu*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139800>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Klaudia Kőbőlová.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Stanovení uhlíkové stopy různých technik zpracování odpadu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. et Ing. Klaudivě Křibové za trpělivost, každodenní ochotu řešit aktuální problémy, cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování této závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Romaně Ondráškové a Ing. Monice Mademli ze společnosti SAKO za poskytnutá data, bez kterých by nebylo možné provést výpočtovou část této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu při celém dosa-  
vadním studiu.



## OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Odpadové Hospodářství .....	11
1.1 Cirkulační ekonomika a oběhové hospodářství .....	11
1.2 Odpad.....	12
1.2.1 Celkový odpad.....	12
1.2.2 Komunální odpad .....	13
1.2.3 Nebezpečný odpad .....	13
1.3 Produkce a nakládání s odpadem v ČR .....	13
2 Uhlíková stopa a globální oteplování .....	15
2.1 Skleníkový efekt a globální oteplování .....	15
2.2 Uhlíková stopa .....	16
2.3 Metodika výpočtu uhlíkové stopy.....	19
3 Stávající technologie zpracování odpadů .....	21
3.1 Technologie a procesy využívající odpad jako materiál.....	22
3.1.1 Recyklace .....	22
3.1.2 Energetické využívání .....	23
3.1.3 Kompostování .....	23
3.1.4 Anaerobní digesce .....	24
3.1.5 Zасыpávání .....	24
3.2 Technologie na odstranění odpadu .....	24
3.2.1 Spalování bez energetického využití.....	24
3.2.2 Skládování.....	24
4 Moderní technologie zpracovávání odpadů.....	26
4.1 Pyrolýza .....	26
4.2 Plazmové technologie .....	26
4.3 MFC .....	27
5 Výpočtový model uhlíkové stopy města Brna.....	28
5.1 Zpracování odpadů v Brně.....	28
5.2 Výpočet uhlíkové stopy .....	29
DISKUSE .....	32
ZÁVĚR.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	39
SEZNAM TABULEK .....	40

## ÚVOD

Jelikož se naše společnost stále vyvíjí a zlepšuje dostali jsme se z bodu přežívání a řešení pouze vlastního blahobytu do doby kdy se zajíme o své okolí a začínáme si uvědomovat, že naše počiny na zemi mají i své následky. Jedním takovým následkem je i produkce odpadu. V dnešní době, kdy celá společnost řeší globální oteplování není otázka odpadů zanedbatelným tématem. Ke konci roku 2019 komise EU přijala European Green deal, kterým se celá Evropa zavázala k snížení čistých skleníkových plynů aspoň o 55 % do roku 2030 oproti roku 1990 tak, aby se Evropa kolem roku 2050 stala prvním klimaticky neutrálním kontinentem. Tento závazek bude pro mnoho členských států těžké splnit. Každoroční nárůst produkce odpadů tomu nijak nepřispívá. Navíc v době, kdy tato práce vznikala, se rozpoutala válka na Ukrajině a pro Evropu bude mnohem těžší než kdy jindy otázky ekologie řešit. Spolu s energetickou krizí a závislostí Evropy na zemním plynu z Ruska bude v příštích letech nutné spoustu cílů poupravit. Navzdory těmto událostem má cenu se o těchto tématech bavit a rozvíjet nové nápady a možnosti, které nás posunou dále.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou spojenou se zpracováním a nakládání s odpady. Využití odpadu jako možného zdroje surovin je idealistická vize, která sebou nese jistá očekávání ale i řadu nástrah, které je potřeba vyřešit. K dobrému porozumění této problematiky je potřeba pochopit všechny aspekty odpadového hospodářství od jeho vymezení přes technologické postupy až k metodice vyhodnocení jednotlivých procesů z pohledu škodlivosti a přínosu. O komplexnosti a možné interpretaci jistých souvislostí není pochyb.

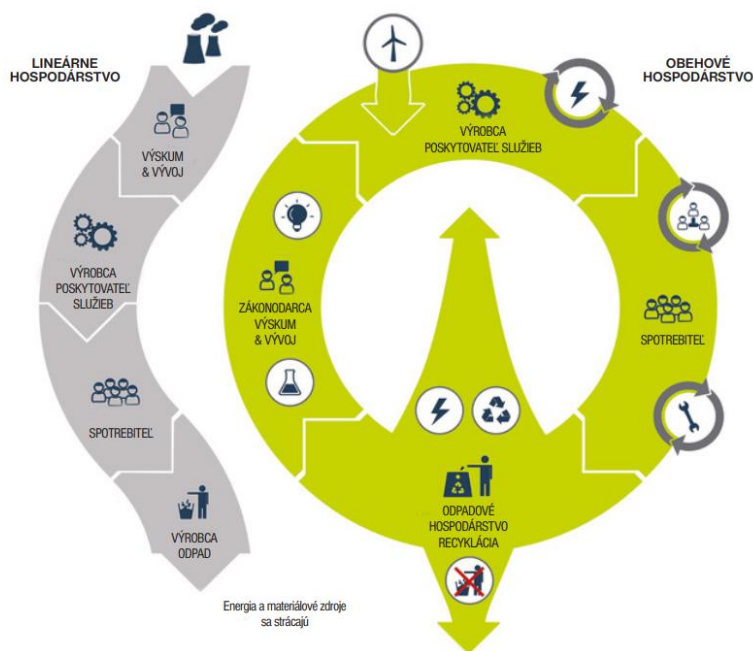
Cílem této bakalářské práce je rešerše problematiky spojené s odpadovým hospodářstvím a rešerše moderních i konvenčních typů zpracování odpadů. Důraz je při tom kladen na ekologické aspekty jednotlivých částí s ohledem na uhlíkovou stopu. Pro vybrané metody je cílem stanovit jejich uhlíkovou stopu tak, aby bylo možné jejich vzájemné porovnání z ekologického hlediska. Dalším cílem této práce je pro zvolené město (Brno) navrhnout smysluplný způsob zpracování vybraného druhu odpadu na základě vypracované rešerše.

## 1 Odpadové Hospodářství

Odpadové hospodářství se zabývá všemi procesy spojené s vznikem, přepravou, likvidací, ale hlavně využitím odpadů. Vnímání odpadu společností se v průběhu let dost podstatně měnilo. Po dlouhá staletí, kdy společnost jenom kočovala nebylo potřeba odpad nijak řešit. Po usazení lidí a vzniku prvních měst se první problémy s odpadem začaly objevovat. Lidé zjistili, že díky kumulaci odpadu v blízkosti obydlí se šíří nemoci jako mor, a tak se naučili odkládat odpadky mimo města. Šlo by říct, že se zde objevuje první odpadové hospodářství. Je zajímavé, že do průmyslové revoluce odpad nebyl nijak velkým problémem, pokud se skladoval mimo města a většina jeho složek měla i své využití. Např. skládka u hlavního města Skotska, Edinburghu, vydržela ve své velikosti až do první poloviny 19. st. a to díky využitelnosti částí odpadu [1]. Veliký problém přišel se stěhováním lidí do velkých měst, kdy množství odpadu a vypouštění zplodin z továren výrazně zhoršovaly životní prostředí. A tak na přelomu 19. a 20. století začaly vznikat první spalovny, kompostárny a řízené skládky. V dnešní době, kdy je na planetě zhruba 8 miliard lidí, se stává odpad velkým problémem. Objevem velkého množství nových materiálů a možností je různě kombinovat vzniká rozličný a druhově rozmanitý odpad, který je těžké likvidovat. Snahou ve velké části světa je v dnešní době předcházet samotnému vzniku odpadu, ale to bohužel nejde vždy.

### 1.1 Cirkulační ekonomika a oběhové hospodářství

Cirkulační ekonomika je koncept, který se zabývá zlepšením životního prostředí a kvality života zlepšováním a zvyšováním efektivity produkce. V odpadovém hospodářství se tím myslí odstoupení od lineárního hospodářství a přejítí na model oběhového hospodářství. V lineárním hospodářství je běžný model života výrobku jako “zrod – použití – vyhození” [2]. Trend takového hospodářství upadá, jelikož vstupní suroviny se rychle mění na odpad. Díky nízkým cenám vstupních surovin byla myšlenka znovupoužití materiálu nevýhodná a neekonomická. Dnes je ale situace jiná z mnoha důvodů. Kvůli stále zvětšující se populaci a rychle docházejících nerostných surovin je lineární hospodářství neudržitelné. Navíc tento model není nijak ekologický už jen z důvodu nevyužívání odpadů [2].



Obr. 1: Porovnaní lineárního a oběhového hospodářství [2]

Oproti tomu oběhové hospodářství razí opačné požadavky. Cílem je navrhnout výrobek s co možná nejdělnější životností a s ekologickým designem. Tím se nemyslí vzhled výrobku, ale možnost ho snadno recyklovat případně znovu použít jeho části. Tím pádem se hodnota materiálu neztrácí v odpadu, ale je maximálně využita. Vzniká tak minimum odpadu, které je možné využít pro výrobu energie (viz kapitoly 3 a 4). Tímto způsobem vzniká cyklus, který jednoduše můžeme nazvat jako oběhové hospodářství [3].

„V roce 2015 přijala Evropská komise první Akční plán pro oběhové hospodářství, který měl napomoci rozběhu udržitelného hospodářství a posilnit globální konkurenceschopnost EU“ [2]. Spolu s Circular Economy Package z roku 2018 se stanovily první cíle pro omezení určitých odpadů. Konkrétně šlo o závazek na rok 2035 k recyklaci 65 % komunálního odpadu (viz 1.2.2) a závazek na rok 2030 k recyklaci 70 % obalového odpadu. Zároveň byl stanoven cíl skladovat maximálně 10 % komunálního odpadu a všechny členské státy přijaly opatření proti znečišťování moří a oceánů [2].

Jedním z posledních a nejzásadnějších rozhodnutí EU bylo v roce 2019 přijetí European Green Deal [2]. Hlavním cílem této dohody je dosáhnout v roce 2050 nulových čistých emisí skleníkových plynů. Zároveň je snaha o stabilní hospodářský růst, který bude oddělen od využívání nových nerostných zdrojů. V neposlední řadě se tato dohoda přizpůsobila pandemii COVID-19 a jedna třetina investic má jít na rozběh ekonomiky po pandemii. V sedmiletém horizontu by mělo jít o 1,8 bilionů eur. Parciálním cílem je snižovat emise skleníkových plynů tak aby v roce 2030 byla jejich produkce oproti roku 1990 snížena o 55 % [4]. Tento závazek je velice ambiciózní a nebude jednoduché ho naplnit. I proto otázka odpadů a transformace odpadového hospodářství bude zhruba po dobu 30 let jedním ze zásadních témat.

## 1.2 Odpad

První výskyt odpadu může datovat již do dávné minulosti kdy pravěcí lidé při svém životu získávali materiály či věci, které už dále nijak nepoužívali. Jako příkladem může sloužit ulovená zvěř. Kromě jídla byla využita kůže na jednoduché oblečení, kly například mohly sloužit jako ozdoba a některé kosti šlo použít na primitivní zbraně. Avšak vždy zbylo něco, co další využití nemělo.

Podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 98/2008/ES je odpad definován jako: „Jakákoliv látka nebo předmět, kterých se držitel zbavuje nebo má v úmyslu se zbavit nebo se od něho požaduje, aby se jej zbavil“ [5]. V dnešní době, kdy používáme rozličné druhy materiálů a využíváme spousty způsobů jejich kombinací vzniká mnoho druhů odpadů. Za odpad tedy můžeme brát například vyhozené věci z domácností, stavební suť, chemické látky vzniklé při výrobních procesech, štěpku vzniklou při zpracování dřeva a mnoho jiného [5].

Odpad můžeme dělit podle chemického složení, místa vzniku, skupenství nebo podle jeho nebezpečnosti. V knize *The Science of Waste* je odpad dělen zhruba do 40 kategorií podle jejich výskytu a vzniku [6]. Sám autor však uvádí, že dělení odpadů se může navzájem prolínat a některé kategorie mohou být spojovány a provázány na základě úhlu pohledu [6]. V české legislativě dělíme odpad do 20 kategorií. Každá kategorie má svou definici a druhové označení [7]. Pro přehlednost a srozumitelnost v této práci odpad bude dělen do těchto základních kategorií.

### 1.2.1 Celkový odpad

Jde o veškerý odpad, který uvažovaný vzorek lidí vytvoří, nehlédě na jeho původ nebo jeho druhovou různorodost. Za celkový odpad se bude považovat odpad, který vzniká v České republice (ČR) nikoliv odpad, který byl na území ČR dovezen [5]. Jde tedy o nadmnožinu pro ostatní odpady.

## 1.2.2 Komunální odpad

Komunální odpad je jednou z nejdůležitějších součástí celkového odpadu. Za komunální odpad je považován směsný odpad a odděleně sbíraný odpad z domácností a od fyzických osob, jakožto papír, sklo, plasty, textil, kov atd. Také je za něho považován odpad, který není vyprodukován tímto způsobem, ale jde o odpad, který je svým složením podobný tomuto odpadu [5]. U komunálního odpadu je největším problémem různorodost. Jelikož do svých košů v domácnostech házíme různorodé materiály je těžké tento odpad zpracovat jinak než jako palivo do tepláren. Na druhou stranu jde o vysoce energeticky hodnotnou směs látek, kdy při spálení ztrácíme významně její potenciál. Proto je nutné se zabývat vylepšením a zavedením nových technologií do procesu zpracování komunálního odpadu tak, aby nám potenciál komunálního odpadu neulétal komíny tepláren.

## 1.2.3 Nebezpečný odpad

Za nebezpečný odpad je považován každý odpad, který má jednu nebo více nebezpečných vlastností uvedených v nařízení Komise (EU) č. 1357/2014. Toto nařízení upravuje přílohu III směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic [5]. Díky tomuto nařízení nebezpečný odpad má 15 podkategorií. Za nejdůležitější podkategorie patří výbušné, oxidující, hořlavé, dráždivé, toxické, žíravé, infekční a mutagenní odpady [8]. U těchto odpadů je primárně důležité zajistit jejich bezpečnou likvidaci a až poté se může společnost zabývat jejich využitelností.

## 1.3 Produkce a nakládání s odpadem v ČR

V ČR, podobně jako v celé Evropě, každoroční přírůstek kilogramů odpadů na obyvatele mírně roste. Poslední 3 roky se pohybujeme okolo 3,5 t odpadů na obyvatele [5]. I když česká populace stále mírně roste má také klesající přírůstek obyvatel, který činí 7838 obyvatel za rok 2020. Navíc se celková produkce odpadů každoročně zvyšuje [5], [9]. Za období 2011–2020 se přírůstek obyvatel snížil o 10 000 [9]. Oproti tomu produkce odpadů za stejný časový interval vzrostl z 32,267 milionů tun odpadu na 38,504 milionů tun odpadu. To znamená, že česká populace se rozšířila o 2 % a česká produkce odpadů vzrostla o 16 % za 9 let [10]. Mohlo by se tedy zdát, že problematika odpadů je již vyřešené téma, kterým se už několik let intenzivně zabýváme, a daří se nám efektivně snižovat produkci odpadů, ale je vidět, že opak je pravdou. Dle těchto dat je jasné, že za zvýšenou produkci odpadů nemůže rostoucí populace. Oproti jiným státům jako je například Čína, Indie, Kambodža nebo mnoho států v Africe, kde je situace s rostoucí populací výrazně jiná, řešíme u nás druhově jiný problém. Dle mého názoru je tento nárůst způsoben stylem života, kdy valná většina společnosti podléhá konzumnímu stylu života. Navíc životnost některých spotřebičů se zkracuje ať už kvůli technickým požadavkům tak kvůli ekonomickému výnosu. Zajímavý je nárůst odpadů za rok 2020 oproti roku 2019. Zde je nárůst odpadů více než o 1,2 milionů tun odpadů [11]. Podle všech ukazatelů si myslím, že tento velký nárůst způsobila pandemie Covidu-19. Potřeba společnosti po jednorázových výrobcích se extrémně zvýšila, a to v kombinaci s životem mnohem více uzavřeném v domácnostech je takový nárůst pochopitelný.

Na druhou stranu je vyvinut veliký nátlak na společnost na snižování produkce odpadů a zvyšování podílu jejich recyklace. Aby ČR dosáhla závazků do roku 2050 vznikla strategie Cirkulační Česko 2040. Tato strategie prosazuje principy oběhového hospodářství a snaží se z tohoto modelu udělat prioritu v odpadovém hospodářství. Díky stanovení jasných cílů bude ČR připravena čelit jak klimatickým změnám, tak bude konkurenceschopná na ekonomickém poli s ostatními státy. V neposlední řadě by měla být republika schopna efektivně čelit výzvám v souvislosti s pandemií Covid-19. „Strategický rámec se zaměřuje na 10 prioritních oblastí: Produkty a design, Spotřeba a spotřebitelé, Odpadové hospodářství, Průmysl,

suroviny, stavebnictví, energetika, Bioekonomika a potraviny, Cirkulární města a infrastruktura, Voda, Výzkum, vývoj a inovace, Vzdělávání a znalosti a Ekonomické nástroje [11].“ V strategickém rámci cirkulární ekonomiky české republiky 2040 se uvádí, že dlouhodobou globální vizí je méně odpadu a více hodnoty pro Českou republiku [11]. Snahou by tedy mělo být snižovat celkovou produkci odpadu na co možná nejmenší možnou míru a již vzniklý odpad maximálně recyklovat. Již vzniklý odpad by se měl přetvářet na hlavní suroviny pro výrobu, kde tento odpad vzniká. Stále se nám ale produkce odpadu nedaří snižovat. Dle mého názoru by jistou možnou alternativou mohl být biodegradabilní nebo jedlý plast.

Jak už bylo zmíněno, v ČR se v roce 2020 vyprodukovalo 38,504 miliónů tun odpadu. Z toho 1,8 miliónů tun odpadů bylo nebezpečných a 5,7 miliónů tun odpadů bylo komunálního. Dle zprávy ministerstva životního prostředí se z celkového objemu odpadu využilo 90 %. Materiálově se využilo 86 % a 4 % odpadů bylo využito energeticky na výrobu tepla a elektřiny. Zbýlých 10 % odpadů skončilo na skládkách [10]. Důležité je si ale uvědomit, které způsoby využití odpadů vedou k opětovnému použití. Pokud se podíváme pouze na recyklaci materiálu tak zjistíme, že pouze 48,2 % odpadů se plnohodnotně vrátí do cyklu jako surovina [5].

Větší výpovědní hodnotu má statistika komunálního dopadu. Z celkové produkce tohoto odpadu se v roce 2020 využilo pouhých 51 %. 48 % tohoto odpadu se skládkuje. I když došlo k mírnému poklesu celkové produkce komunálního odpadu tak procentuálně došlo o zvýšení skládkování odpadu o 2 % oproti roku 2019 [5], [10]. Jednotlivé způsoby nakládání s odpady jsou popsány v kapitole 3.

## 2 Uhlíková stopa a globální oteplování

### 2.1 Skleníkový efekt a globální oteplování

V předchozí kapitole 1 se řešila problematika odpadů spojená s nakládáním, množstvím a případným využitím. Bohužel toto není jediné úskalí, kde odpad figuruje. Pro eliminaci či využití odpadů je nutné odpad nějak zpracovat. Zpracování odpadů probíhá různými technologiemi a postupy (viz 3). Všechny tyto postupy mají ale společnou jednu vlastnost, a tou je vznik plyných sloučenin. V této směsi plynů se také vyskytují plyny jako je oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ), oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ), vodní pára ( $\text{H}_2\text{O}$ ) a halogenderiváty uhlovodíků, v ČR známé jako freony (CFC). Jedná se o nejvýznamnější skleníkové plyny. Všechny tyto plyny způsobují ohřívání zemského povrchu díky skleníkovému efektu [12].

Slunce díky své vnitřní termonukleární reakci vyzáří záření, které se částečně odrazí od zemské atmosféry, ale také určitá část pronikne atmosférou až na povrch Země. Zde je záření absorbováno a energie záření je částečně přeměněna na teplo. Kromě ohřevu také povrch vyzáří dlouhovlnné záření. Toto záření má ale větší vlnovou délku než sluneční a kvůli Planckově zákonu už atmosféra není tak transmisivní a toto záření se odrazí nazpět. Takto odražené záření je uzavřeno mezi povrchem a atmosférou a dochází tak k zvyšování ohřevu Země. Tomuto efektu se říká Skleníkový efekt [12].

Skleníkový efekt dostal název díky tomu, že sklo ve skleníku se chová podobně jako zemská atmosféra a tento efekt v něm můžeme dobře pozorovat [12]. Díky skleníkovému efektu také vznikl život na Zemi. Existuje ovšem určitá rovnováha tak, aby na Zemi nebyla teplota příliš nízká ani vysoká pro život. Proto určitá koncentrace těchto plynů spolu s vodní párou (také skleníkový plyn) je nezbytná. Lidskou činností je ale tato rovnováha hrubě narušena a kromě zvyšování koncentrace skleníkových plynů vytváříme nové mnohem stabilnější a nebezpečnější skleníkové plyny. Dobrým příkladem jsou již zmíněné CFC, které kromě skleníkového efektu vytvořily ozonovou díru. Plyny CFC jsou velice stabilní a při kontaktu s nestabilním ozonem ( $\text{O}_3$ ) ho ničí a vytváří tak ozonovou díru. Jelikož  $\text{O}_3$  absorbuje ultrafialové záření, které je velice škodlivé, je jeho absence v atmosféře také velkým problémem. CFC se začali používat kolem roku 1980, a to jako hnačí plyn pro spreje a jako chladicí plyn v chladicích zařízeních [12]. V dnešní době je jejich použití zakázané [13].

Díky těmto plynům dochází k zvýšení teploty na celé planetě. Jde tedy o globální problém, který postihuje všechny oblasti, ale jeho důsledky se mohou výrazně lišit v závislosti na typu krajiny. Hlavním problémem je zvyšující se teplota, která způsobuje velké nárazové výkyvy počasí [12]. Takovéto velké výkyvy způsobují klimatické pohromy jako bylo tornádo na Moravě v létě 2021 nebo záplavy v Kanadě téhož roku. Jde tedy o lokální pohromy, které se stávaly i dříve, ale díky příspěvku globálního oteplování jich může být stále více.

Dalším problémem je zvyšující se hladina moří a oceánů. Zvyšující teplota zvyšuje objem vody v oceánech a mořích, a i když jde jen o pár stupňů tak v celkovém objemu této vody jde o významné změny. Podle nejhorších predikcí v roce 2090 by hladina moří měla oproti roku 1990 zvýšit svoji hladinu skoro o jeden metr. To se sice nezdá jako moc, ale například v Bangladéši okolo ústí řeky Ghangy by to znamenalo, že 15 milionů lidí přijde o půdu na které žijí [12]. Navíc ledovce významně odtávají, a to jednak zvyšuje hladinu moří, ale navíc ničí prostor pro organizmy žijící na těchto plochách.

Velkou roli hraje také globální oteplování u spodních zdrojů vody. V oblastech, kde byla po dlouhé roky situace s vodou naprosto dostačující a vody bylo dost se nyní objevují mnohem větší sucha. Navíc kromě sucha přicházejí po dlouhých intervalech sucha mohutné záplavy [12]. Je to opět způsobenou nárůstem teploty. Na druhou stranu v oblastech jako je Sibiř, Grónsko nebo severní Kanada mírné oteplení má jistý pozitivní efekt na zemědělství. Dá se tedy říct, že úrodné oblasti s dostatkem vody se přesouvají na místa, která nejsou zatím

tak moc zemědělsky vytižena [12]. Pro obyvatele mírného, subtropického a tropického pásu tyto změny nebudou nijak pozitivní. S tím souvisí, že v našich podmínkách bude zemědělská úroda nižší, i když pro konkrétní odvětví tomu může být i naopak [12]. Dobrým příkladem je například víno, kterému se při vyšších teplotách daří lépe. Voda se z našeho světa nemá kam vytrátit, takže se dá představit, že se pouze přesouvá k pólům planety a na spoustě místech způsobuje i jiné problémy. Pro lidstvo to zatím není až takový problém. Pole se dají přesunout, obměnit pěstované suroviny nebo vyšlechtit odolnější plodiny, které zvládají sucho. Při ignorování těchto změn může ale dojít k větším škodám a problémům.

Posledním faktorem jsou zvětšující se pouštní oblasti po celém světě. Rychle vypařující se voda dává prostor pouštím k expanzi do míst, kde v minulosti bylo vody dostatek [12].

Jak už bylo zmíněno s problematikou tajících ledovců, odtávající led z ledovců ubírá životní prostor spoustě organismům, ale to není jediné místo, kde problém s celými ekosystémy můžeme pozorovat. Z celosvětové suchozemské plochy 10 % zabírají pro zemědělské působení, které bude potřeba přesunout nebo upravit, ale 30 % zabírají lesy a deštné pralesy, které přesunout nejde [12]. Pro celé ekosystémy jako jsou například již zmíněné deštné pralesy nebo rozsáhlé korálové útesy takovéto migrace nejsou schopny z podstaty věci provádět. Navíc i mnoho živočichů přichází o svá napajedla a teritoriální území a jsou nuceny migrovat na velké vzdálenosti. Určitým způsobem je příroda velice silná a těmto změnám do jisté míry dokáže odolávat, ale je otázkou, kdy toho již nebude schopná. V neposlední řadě problémy, které mají deštné pralesy, pocítíme i v blízké budoucnosti my jakožto lidstvo pro které pralesy představují plíce světa [12]. Rozhodně je důležité říct, že svět se nehroutlí, ale je potřeba se o tomto tématu aktivně bavit a hledat nové řešení.

## 2.2 Uhlíková stopa

Kvůli škodlivosti skleníkových plynů je nutné se jejich problematikou aktivně zabývat. Bylo proto nutné, aby vznikla veličina, která by popisovala množství produkce skleníkových plynů. Ve společnosti se ale nemluví o stopě skleníkových plynů ale o uhlíkové stopě. Důvodem je to, že zásadním problémem dneška je uvolňování uhlíku do ovzduší [12]. Vázaný uhlík do molekul se při naší činnosti uvolňuje do ovzduší a zde majoritně vytváří molekuly CO<sub>2</sub>. Objemy takto vznikajícího plynu jsou extrémní, a tím pádem je CO<sub>2</sub> hlavním škodlivým skleníkovým plynem [14]. I když CO<sub>2</sub> svými vlastnostmi není pro globální oteplování nejhorší a známe mnohonásobně škodlivější plyny, stal se z CO<sub>2</sub> jakási tvář tohoto problému. Proto se mluví o uhlíkové stopě.

Vysvětlena byla první část uhlíkové stopy a je potřeba dovysvětlit druhou část tohoto slovního spojení. Každý člověk či společnost svým životem a působením provozuje řadu aktivit. Při různých aktivitách vznikají již zmíněné skleníkové plyny, které zůstávají v atmosféře. Slovo stopa tedy v tomto kontextu znamená jakýsi pomyslný zásobník každého jedince nebo společnosti, do kterého se ukládá námi vyprodukovaný skleníkový plyn [14].

Rostoucí produkce skleníkových plynů je ve vysoké míře ovlivněna velkou produkcí odpadů. Emise vzniklé při výrobě, distribuci a použití výrobků jsou s odpady spojeny, i když se ještě nejedná o odpad. Na druhou stranu produkce těchto výrobků významně přispívá k růstu ekonomiky, a tedy jejich produkce nelze eliminovat. Z výzkumů vyplývá, že průmyslový rozvoj a ekonomický růst přímou úměrou koreluje s produkcí odpadů. Vyspělé státy s dobrou ekonomikou tedy produkují více odpadů než rozvojové státy [14]. V dnešní době většina vyspělých států se snaží s ekologickými problémy bojovat a snižovat svůj příspěvek ke globálnímu oteplování. Kvůli množství produkovaných odpadů je potřeba u každého typu odpadu najít ideální způsob zpracování tak, aby množství skleníkových plynů bylo omezeno na minimum.



Jako příklad kumulace uhlíkové stopy může sloužit svoz komunálního odpadu a jeho následné zpracování. U tohoto příkladu nebudou uvažovány emise, které jsou spojeny s výrobky a materiály, než se staly odpadem. Takto budou vypuštěny emise při těžbě a zpracování surovin na výrobu daných výrobků a emise spojeny s následným transportem ke koncovému zákazníkovi. Emise, které se budou uvažovat, jsou spojeny až s vzniklým odpadem. U komunálního odpadu je první viditelná emise spojená s dopravou vyhozeného materiálu na místo zpracování. Nejčastěji je svoz prováděn popelářskými auty, které svým provozem vytváří nemalé množství výfukových plynů a spojených emisí. Následuje zpracování, které hraje valnou roli v uhlíkové stopě odpadů. V uvažovaném příkladu se komunální odpad nejčastěji zpracovává energetickým využitím nebo skládkováním. U každého typu zpracování vznikají jiným způsobem emise (viz 3). Kromě zřejmých primárních emisí je nutné uvažovat emise například spojené s výstavbou zařízení na zpracování odpadů nebo emise spojené s výrobou popelnic a kontejnerů na odpad. Všechny tyto emise se určitým klíčem dávají dohromady a vytváří celkovou uhlíkovou stopu komunálního odpadu.

Je tedy zřejmé, že kromě ekonomického a legislativního aspektu zpracování odpadů je potřeba řešit pro každý typ odpadu konkrétně i jeho zpracování a způsob, kterým se s ním nakládá i z hlediska uhlíkové stopy. V minulých letech byl například odpad vyvážen z Evropy do Asie a až zde byl odpad recyklován a likvidován [15]. Z ekonomického hlediska toto řešení v krátkodobém horizontu bylo přijatelné, ale z dnešního pohledu je to nepřijatelný způsob. I při odmýšlení faktu, že odpad nebyl vždy využit ani likvidován a často končil v oceánech, je samotný transport odpadu velkým přispěvatelem k zvýšení uhlíkové stopy odpadu [16].

Zajímavé je také si uvědomit, jak moc přispívají k zvyšování koncentrací  $\text{CO}_2$  živočišné dýchání. Každý živočich vydýchává určité množství oxidu uhličitého, kterým přispívá ke globálnímu oteplování. Například dospělý člověk v klidovém stavu vyprodukuje dýcháním zhruba  $0,7 \text{ g CO}_2$  za minutu a při zátěži až  $14 \text{ g CO}_2$  za minutu [17]. Dobrou demonstrací je pak příklad, který uvádí prof. Ing. Pavel Noskovič, CSc. ve svých úvahách, kdy srovnává cestu do práce 5 lidí společným autem a běh každého z jednotlivců. Z nich vyplývá, že při fyzické aktivitě daných pěti lidí vznikne zhruba jedenapůlkrát více emisí než při využití spalovacího motoru [17]. Tento příklad není faktickým výpočtem, ale poukazuje na fakt, že lidský a i jiný živočišný metabolismus není zanedbatelný u celkového pohledu na danou problematiku.

Definice uhlíkové stopy není jednoznačně daná a v určitém kontextu se mohou jednotlivé významy lišit. Obzvlášť pokud jde o typ vyhodnocení a metodiky stanovení uhlíkové stopy. První pohled na uhlíkovou stopu představuje měřítko ekologické závažnosti a na druhou stranu je to pouze vnímáno jako posuzování životního cyklu na změnu dopadu klimatu [14]. Nejčastější definice je spojení určitého objemu skleníkových plynů s konkrétní lidskou přírmou i nepřímou činností, produktem nebo populací a jde o jeden z nejdůležitějších ekologických indikátorů ochrany [18].

Skleníkových plynů je veliké množství, ale ve společnosti se mluví pouze o uhlíkové stopě a mohlo by se zdát, že ostatní plyny nehrají žádnou roli. Není tomu tak. V rámci uhlíkové stopy se počítá se všemi těmito plyny. Mezi  $\text{CO}_2$  a každým jiným plynem existuje převodní vztah, který určuje, jak moc je daný plyn škodlivý oproti  $\text{CO}_2$  a jakým množstvím je nutné ho nahradit [19]. Funguje to úplně stejně jako převody mezi měnami, kdy  $\text{CO}_2$  je jakýmsi americkým dolarem, který je univerzální a v celém světě dobře známý. Takže místo sčítání jednotlivých škodlivostí plynů převedeme vše na  $\text{CO}_2$  a počítám tak s nahrazenými veličinami. Tento směnný převod zastřešuje tzv. potenciál globálního ohřevu (GWP), který vyjadřuje příspěvek daného plynu ke globálnímu oteplování. Pomocí těchto koeficientů se stanovuje tzv. ekvivalent  $\text{CO}_2$  (zapisován jako  $\text{CO}_2 \text{ ekv.}$ ,  $\text{CO}_2 \text{ eq.}$  nebo  $\text{CO}_2\text{e}$ ), tedy množství  $\text{CO}_2$ , které by mělo ekvivalentní příspěvek ke skleníkovému jevu jako dané množství plynu [19]. Pro vybrané plyny jsou hodnoty GWP vidět v Tab. 1. Tyto hodnoty jsou ze zprávy IPCC z roku 2014 [20]. Každá tato zpráva upravuje hodnoty tak, aby odpovídaly nejnovějším výzkumům.

Tab. 1: Přehled vybraných skleníkových plynů [19]

Skleníkový plyn	Zdroje (z lidské činnosti)	GWP
<b>Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)</b>	Spalování fosilních paliv a biomasy (80 %); odlesňování; aerobní rozklad organických látek; eroze	1
<b>Metan (CH<sub>4</sub>)</b>	Rozklad organických látek, spalování biomasy a skládky odpadů (5 %); zpracování zemního plynu a ropy, úniky plynu, chov dobytka, pěstování rýže (25 %).	25
<b>Oxid dusný (CO)</b>	Zemědělská činnost, výroba kyseliny dusičné a adipové, spalovací procesy, raketová a letecká technika.	298
<b>Vodní pára (H<sub>2</sub>O)</b>	Odpařování z vodních ploch; spalování fosilních paliv a biomasy, ochlazování rostlin	2–3

Důležité je se také zmínit o vodní páře. Jde o primární a přirozený skleníkový plyn, co se týká výskytu na Zemi, ale svým chováním se o něm mluví jako o sekundárním [20]. Po vypaření vody z povrchu Země se voda dostává do atmosféry, kde se ochlazuje a kondenzuje. Do jisté míry je tak koncentrace vodní páry v atmosféře regulována. To způsobuje to, že při určité teplotě zůstává koncentrace vodních par v ovzduší konstantní. Jakmile ale dojde k vyloučení většího množství CO<sub>2</sub> do ovzduší dojde k mírné ohřátí planety, a to způsobí zvýšení koncentrace vodní páry v ovzduší, a to dále podpoří globální oteplování [20]. Každý stupeň, o který se ohřeje ovzduší umožní zvýšení vodní vlhkosti v ovzduší zhruba o 7 % [20]. Toto navýšení vlhkosti zrychluje globální oteplování a v literatuře se často popisuje jako zpětná vazba vodních par. Na druhou stranu, pokud by došlo k velkému snížení CO<sub>2</sub> v atmosféře velké množství H<sub>2</sub>O by zkondenzovalo a ze Země by se stala studená a ledová planeta [20].

Dalším důležitý faktor, kterým se využívá při popisu uhlíkové stopy jsou emisní faktory (EF). Obzvláště v energetickém průmyslu mají veliký význam. Jde o empiricky stanovenou veličinu, která vyjadřuje střední množství škodlivin na určitou jednotku energie v látce obsažené, které se uvolní při daném procesu [21]. Například černé uhlí při spalování má EF=89,8 t CO<sub>2</sub>/TJ [19]. U výroby elektřiny tak je možné zjistit kolik škodlivin vznikne při výrobě jedné GWh elektrické energie. Navíc se emisní faktory dají získat i pro jednotlivé výrobky, jako je například mobilní telefon či televizor [19].

Při stanovování uhlíkové stopy je také důležité znát typ věci, pro kterou je uhlíková stopa počítána. Pokud se jedná o výpočet uhlíkové stopy například podniku, je nutné do výpočtu zahrnout kromě zprvu jasných aktivit jako je například spotřebovaná energie nebo výrobní materiál také dopravu zaměstnanců, jejich jídlo a mnoho dalších odvětví [19]. Při výpočtu uhlíkové stopy výrobku tomu bude velice podobně. Zde se musí kromě výroby zahrnout i doprava výrobku k spotřebiteli a následné odpadové hospodářství. Kvůli velikému rozsahu aktivit vzniklo dělení činností do tak zvaných Scopes. Jde o mezinárodně používaný standart.

Scope 1 definuje přímé emise. Jde tedy o aktivity, které jsou přímo ovlivněny a kontrolovány danou společností. Jedná se tak o emise vzniklé při výrobních procesech a výfukové plyny z automobilů a jiných strojů vlastněné firmou [19]. Tato skupina emisí se dá dobře měřit a mít ji pod kontrolou.

Scope 2 definuje nepřímé emise z energie. Jde o emise spojené s výrobou nakupovaného tepla a elektřiny. Firma je sice sama neprodukuje, ale významně se podílí svým odběrem na jejich vzniku [19].

Scope 3 definuje další nepřímé emise. Jde o emise, které nejsou pod kontrolou podniku a nesouvisí s energetikou. Jde tedy například o služební cesty letadly, dopravu materiálu cizí společností, dopravu zaměstnanců do firmy nebo nakládání s odpadem vzniklým

v podniku [19]. Tyto emise se velice špatně měří a kontrolují, a proto často při stanovování kompletní zprávy o uhlíkové stopě podniky se pouze sčítají emise ze scope 1 a 2. Z kategorie scope 3 se pouze vybírají velké nejdůležitější položky, ale celou tuto kategorii prakticky nejde vykalkulovat [19]. Všechny tyto kategorie a poučky platí i pro výpočty uhlíkové stopy měst krajů a států.

Kromě snižování produkce skleníkových plynů je důležitá i kompenzace. Takovouto možnost zastřešují offsety. Jde o kvantifikované projekty, které mají striktně dané cíle a dohlíží se na plnění těchto cílů [19]. Jedním z nejčastějších offsetů je výsadba stromů a jiných rostlin. Zde je ale velice těžké rozeznat, které výsadby stromů jsou komerční a které opravdu mají zásady tak, aby je bylo možno brát za offset [22]. Mělo by jít hlavně o biodiverzitu výsadby. Dále je potřeba zjistit, zda nejde jen o obnovu či výsadbu stromů za pokácené stromy. Z výzkumů vyplývá, že nejčastěji vysazované stromy jsou stromy na komerční zisk, kde se nedá prokázat, že po krátké době jsou káceny [22]. Jako dalším příkladem offsetu je bioreaktor, který pomocí růstu řas snižuje koncentrace CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech.

### 2.3 Metodika výpočtu uhlíkové stopy

Jde o poměrně komplikovaný výpočet, u kterého není problémem složitost vzorců, ale jejich správné použití a využití vhodné metodiky. Nejprve je potřeba určit parametry děje, pro který bude uhlíková stopa počítána. Musí se tedy určit pro každý proces odpovídající emisní faktor [23]. To není vždy jednoduché, protože určení přesné hodnoty EF je zdlouhavý a drahý proces, a proto se využívají hodnoty pro podobné děje, které již byly stanovené. Je nutné tedy najít studii, kde tyto faktory jsou stanovené pro co možná nejpodobnější podmínky měřeného děje. Kromě hodnoty EF se také využívá GWP, kdy spolu tvoří výpočetní vzorec pro uhlíkovou stopu.

$$E = EF * Q_i * GWP \quad (1)$$

kde E je uhlíková stopa aktivity, EF je emisní faktor dané aktivity, Q<sub>i</sub> je míra aktivity a GWP je potenciál globálního ohřevu. Tímto způsobem se vypočítá uhlíková stopa jednoduché aktivity například jízda automobilem. Pokud je potřeba vypočítat uhlíkovou stopu většího celku jako je například uhlíková stopa podniku jsou tyto jednoduché uhlíkové stopy sečteny do celkové uhlíkové stopy aktivity. Navíc se takto dají určovat jak přímé, tak nepřímé emise [23]. Výsledný vztah pro výpočet uhlíkové stopy procesů zpracovávajících odpad využívá koeficienty z řady studií zabývajících se problematikou odpadů. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2 a Tab. 3.

$$C_f = E_{Ci} * Q \quad (2)$$

kde C<sub>f</sub> je celková uhlíková stopa procesu, E<sub>Ci</sub> je měrná uhlíková stopa procesu a Q je množství zpracovávaného odpadu.

Tab. 2: Uhlíková stopa kompostování bioodpadu

Zdroj	Předpokládané vstupy	Hodnota [tCO <sub>2</sub> e/t odpadu]
Orner et al. (2013) [24]	zahrnuty všechny okolní vlivy jako doprava, zpracování, likvidace zbylých produktů nebo sušení	-0,2
CI2, o. p. s. (2016) [25]	využití specifických emisních faktorů příslušného zařízení, nespecifikovaný bioodpad	0,2
Blengini (2007) [26]	stanoveno pro vyzrálý kompost	0,133–0,213
Vieira et al. (2019) [27]	kompostování na otevřeném poli, v potaz byla vzata vlhkost kompostu	0,003–0,242
White et al. (2012) [28]	všeobecný bioodpad	0,323
ADME (2012) [28]	stanoveno pro bioodpad obsažený v komunálním odpadu	0,286–0,363

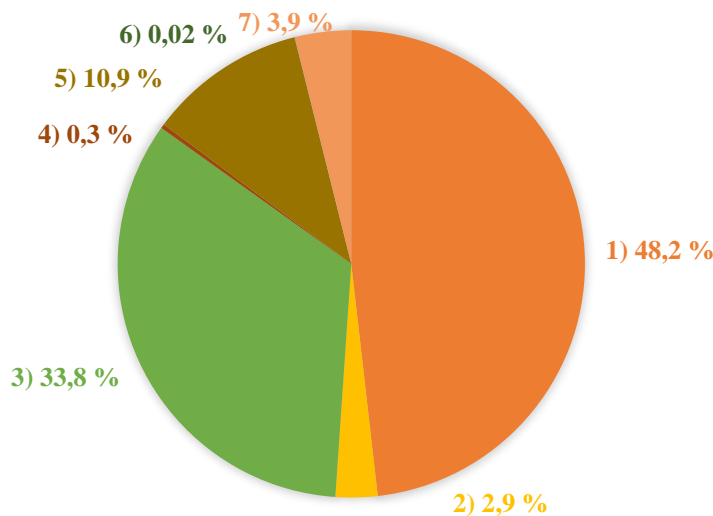
Tab. 3: Uhlíková stopa anaerobní digesce bioodpadu

Zdroj	Předpokládané vstupy	Hodnota [tCO <sub>2</sub> e/t odpadu]
Orner et al. (2013) [24]	zahrnuty všechny okolní vlivy jako doprava, zpracování, likvidace zbylých produktů nebo sušení	-0,322
CI2, o. p. s. (2016) [25]	místní / dovezená biomasa, nespecifikovaný bioodpad	0–0,385
IPPC (2006) [28]	zanedbané emise N <sub>2</sub> O, nespecifikovaný bioodpad	0,025
Jeongt et al. (2019) [28]	započítané emise N <sub>2</sub> O oproti IPPC, nespecifikovaný bioodpad	0,18
Based on Jeongt et al. (2019) [28]	započítané prchavé emise, nespecifikovaný bioodpad	0,23
Vieira et al. (2019) [27]	vlhký rozemletý bioodpad	0–0,048

### 3 Stávající technologie zpracování odpadů

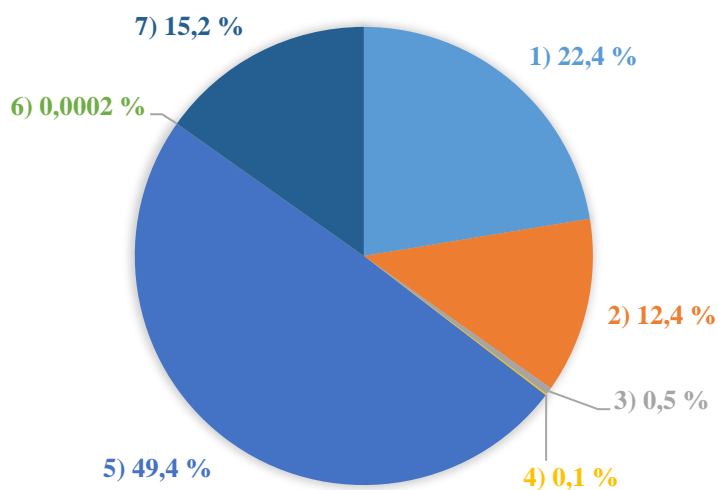
Odpadové hospodářství dělíme do dvou kategorií. První kategorií jsou technologie a postupy, které využívají odpad jako materiál k opakovanému využití nebo jako vstupní surovinu do energetických procesů. Druhou kategorií jsou procesy, kdy z nějakého důvodu odpad nepředstavuje vhodný materiál pro další využití, a tak jsme nuceni tento odpad odstraňovat. Nejčastěji jde o nebezpečné odpady, které je potřeba odstranit, aby nedošlo ke větším škodám, než je ztráta tohoto materiálu. Nebo jde o odpad, který nemá ekonomicky výhodné zpracování [5].

První kategorii dále dělíme do 4 nejvýznamnějších podkategorií. Konkrétně jde o energetické využití, recyklaci, kompostování a zasypávání. V druhé kategorii jsou dva hlavní proudy, a to spalování bez energetického využití a skládkování [5].



Obr. 2: Nakládání s komunálním odpadem v České republice, [5]

1 – recyklace materiálů, 2 – kompostování, 3 – zasypávání, 4 – spalování bez energetického využití, 5 – skládkování, 6 – ostatní nakládání, 7 – energetické využití



Obr. 3: Celkové nakládání s odpady v České republice, [5]

1 – recyklace materiálů, 2 – kompostování, 3 – zasypávání, 4 – spalování bez energetického využití, 5 – skládkování, 6 – ostatní nakládání, 7 – energetické využití

### 3.1 Technologie a procesy využívající odpad jako materiál

Tyto metody odpovídají nebo se snaží částečně přiblížit konceptu oběhového hospodářství. Z hlediska časového vývoje problematiky řešení odpadů jsou tyto postupy modernější. Snahou je tedy využívat odpad jako surovinu do těchto postupů co možná v největší míře. U těchto technologií bývá primární investice do výstavby zařízení vyšší, ale má větší potenciál v návratnosti.

#### 3.1.1 Recyklace

Primární suroviny do výrobních procesů se stávají čím dál více nedostupné a jejich přímá přeměna na odpad vede k velkým ekologickým problémům. Proces recyklace umožňuje z odpadu vytvořit opět použitelné primární suroviny. V hierarchii postupů zpracování odpadů má recyklaci primární postavení kromě odpadů, u kterých by ekologické znečištění při tomto procesu bylo příliš velké [29]. Občas bývá recyklace zaměňována za opětovné použití což není pravda. U opětovného použití jako je tomu například u vratných láhví na pivo odpad vůbec nevzniká, a proto definici recyklace neodpovídá. Je tedy jasné, že pro odpad je nejlepší využití recyklace, ale lepší je, pokud odpad vůbec nevzniká, například díky opakovanému použití [29]. Dalším důležitým faktem je, že pro recyklaci je vhodný plně roztríděný odpad na jednotlivé složky. V tomto stavu se dá odpad téměř z 100 % recyklovat. Je tomu tak například u skla, papíru některých platů, betonů a kovů. U komunálního odpadu je recyklace mnohem náročnější. Z celosvětové produkce komunálního odpadu se 80 % skládkuje nebo se spaluje [29]. V neposlední řadě u recyklace je problém s kontaminací odpadů jak chemicky, tak fyzikálně vázaných látek do odpadů [29]. Ty se buď dají odstranit předúpravou a pak je takový odpad dále využitelný nebo dojde k neupravitelnému znečištění a takový odpad se musí zlikvidovat.

U recyklace papíru a lepenky se používá chemické a mechanické rozvláknování sítě vláken z buničiny. Vzniklý recyklát se může použít jako primární surovina nebo se může nakombinovat s původní surovinou. Recyklací se ovšem vlákna zkracují, a tak lze papír recyklovat maximálně šestkrát [29]. Recyklovaný papír prochází čistícím procesem v rámci, kterého se může objevit de-inking proces, který zbaví buničinu barviv, tak aby mohl vzniknout bílý recyklovaný papír.

U recyklace skla jde o typ recyklovaného skla. Pro každý typ skla se hodí jiný typ recyklace. V základu se nejčastěji používají 3 typy skel. Sodno-vápenaté sklo na potravinářské výrobky a na skla do oken. Krystal na výrobu vysoce kvalitního skla a borosilikátové sklo (Pyrex) sklo pro použití ve vyšších teplotách [29]. Nejčastější recyklace skel je přetavením, ale tato technologie funguje pouze u sodno-vápenatého skla. Toto sklo je zároveň také nejčastější a při jeho recyklaci prakticky nejsou žádné problémy.

Beton se řadí na druhé místo nejpoužívanějších materiálů na světě [29]. Recykluje se ale pouze malé množství. Hlavním způsobem recyklace je rozbití betonu na jemný prášek, který se dá znovu použít. Nejčastější metody jsou mechanické drcení a selektivní fragmentace pomocí vysoko pulzního elektrického výboje nebo díky elektromagnetické energii mikrovln [30].

U recyklace kovů by se mohlo zdát, že je tento proces bez problémů. Avšak kvůli částečnému míšení kovů z technologických důvodů je recyklace náročná. Kovový šrot se z pravidla drtí a podle svého složení je metalurgicky upravován [30]. Separace jednotlivých kovů je výrazně ovlivněna požadovanou výstupní kvalitou a vzájemnou interakcí kovových složek. U některých materiálů tedy může jít o velice ekonomicky náročnou operaci [29].

Každá doba dějin nese díky nějakému znaku určitý název a je dost pravděpodobné, že naše doba ponese přívlastek plastová. Plastem jsme takřka obklopeni neustále. Proto se recyklaci plastů věnuje velká pozornost. Plasty dělíme na dvě hlavní kategorie, a to reakto-

plasty a termoplasty. Reaktoplasty mají síťovanou strukturu a mají velmi dobrou odolnost vůči otěru [29]. Bohužel jsou tyto plasty náročné na recyklaci. Příkladem z této skupiny jsou například plasty tvořící pneumatiky. Termoplasty jsou vytvořeny směsí dlouhých polymerních řetězců. Tyto plasty za zvýšených teplot jsou velice tvárné a měkké. Tvoří hlavní složku všech plastů a to zhruba 80 % [29]. Tento druh plastu je dobře recyklovatelný. Recyklace plastů probíhá mechanicky nebo chemicky. Při mechanické recyklaci je plastový odpad drcen na malé kousky, které lze přimíchat do původního materiálu. Chemický proces staví na destrukci plastů a vytvoření monomerů k chemickému použití [29]. Obecně je ale za potřeby separovat jednotlivé druhy plastů od sebe což celý proces recyklace zdražuje. Časté výrobek z recyklovaných plastů je oblečení z umělé hmoty nebo například zátěžové koberce. Velké množství plastů se nachází v komunálních odpadech, kde je jejich recyklace velice náročná. Více o dalších technologiích recyklujících a využívajících takřka celé spektrum plastů viz 4.

### 3.1.2 Energetické využívání

Při energetickém využití se odpad spaluje jako palivo na výrobu tepla případně elektrické energie. Tato technologie by se měla využívat až po úplné recyklaci a upřednostňovat před skládkováním. V praxi tomu tak ale není z ekonomických a kapacitních důvodů. Zejména je tomu tak u komunálních odpadů, které by bylo velice drahé roztrždit tak, aby se recyklace ekonomicky vyplatila [2]. Proto se hojně v Evropě využívá komunální odpad jako palivo. Spálením 1 tuny komunálního odpadu lze vyrobit až 550 kWh energie [29]. Navíc se uvádí, že díky spálení takového množství odpadů se zamezí vzniku 1 tuně ekvivalentu CO<sub>2</sub> oproti uložení tohoto odpadu na skládku, kde by vznikala metan a jiné toxické látky při rozkladu odpadu [29]. Komunální odpad je vysoce heterogenní směs, která občas bývá před samotným spálením upravena, aby byla zvýšená její výhřevnost a spalitelnost. Výhodou, avšak zůstává, že odpad je samo vznětlivý a nepotřebuje tedy žádné přídavné palivo na jeho spálení [29].

U spalování komunálních odpadů je zřejmé, že jde o využívání, ale zároveň kvůli obsahu fosilních látek nelze říct, že jde o obnovitelný zdroj. Něco jiného je však tomu u spalování bioplynu vzniklého z bioodpadu. Ten vzniká díky anaerobnímu rozkladu bioodpadu. Princip výroby energie je stejný jako například u bioplynové elektrárny. V takovém případě už lze hovořit o obnovitelném zdroji [29].

Velkou překážkou v spalování a využívání odpadů jako energetického zdroje tkví v přísných legislativních normách pro emise a postupy, které dovolují odpad spalovat. Energetické využívání odpadů probíhá v zařízeních na energetické využití odpadů (ZEVO), a ne ve spalovnách. Hlavním rozdílem oproti spalovně je kromě samotné výroby energie také mezi skládkováním, úprava odpadů a čištění spalin a pevných a kapalných zbytků [2]. Je zřejmé, že náklady na nové ZEVO nejsou malé, a proto není jednoduché nové ZEVO zařízení vybudovat. Možným řešením je spolu spalování. V takovém případě se odpad přidává k standardním fosilním palivům jako je například uhlí nebo ho dokonce úplně nahradí [2].

### 3.1.3 Kompostování

Kompostování je v principu velice jednoduchá technologie ale při správném provedení se dá významně zefektivnit. Jde o aerobní fermentační proces. Tento proces umožňuje zhodnocovat odpad a vytváří z něj stabilizovanou organickou hmotu zvanou také jako kompost. Kromě kompostu vzniká také CO<sub>2</sub>, voda a minerální látky. Touto technologií lze zpracovávat veškerý biologicky rozložitelné odpady. Proces může probíhat přírodním procesem díky bakteriím, mikroorganismům a přírodnímu prostředí anebo technologickými postupy. První postup se hodí pro menší objemy například pro rodinný kompost a druhým postupem se zpracovávají například čistírenské kaly nebo papír. S výhodou se dají oba procesy kombinovat [29].

### 3.1.4 Anaerobní digesce

Jde o proces podobný kompostování jen je u něho zamezeno přístupu vzduchu – zejména  $O_2$ . Při tomto procesu vzniká bioplyn, který je možno energeticky využít. Bioplyn je majoritně směsí  $CH_4$  (55–75 %),  $CO_2$  (30–45 %) a v malém množství se zde vyskytuje  $H_2$ ,  $H_2O$ , kyslík ( $O_2$ ) a dusík ( $N_2$ ). Celý proces se odehrává ve čtyřech fázích, kdy biologicky rozložitelný materiál je přeměňován mikroorganismy na výsledný plyn [31]. Těmto procesům podléhají všechny skupiny látek obsažené v bioodpadu. Těmi jsou sacharidy, proteiny a lipidy. Tento způsob nakládání s odpady má největší potenciál u zemědělských odpadů. U čistírenských bioplynových stanic a u odplyňovacích skládkových stanic (viz 3.2.2) je potenciál v ČR téměř vyčerpán. Podstatné je zmínit, že využití instalovaného výkonu u bioplynových stanic je několiknásobně vyšší než v součtu instalovaný výkon u fotovoltaických a větrných elektráren v ČR [29]. Navíc jde o stabilní a dobře regulovatelný zdroj.

### 3.1.5 Zасыpávání

U zasypávání se spíše, než o technologii dá mluvit jako o inteligentním skládkováním. Zde se žádný materiál nevrací do výrobního procesu. Odpad zde v majoritní většině slouží jako stavební materiál. Dá se použít jako výplň do základů, určité složky se dají přimíchat do silničního asfaltu atd. Takto používaný odpad bývá nejčastěji stavební suť, pevné zbytky z procesu spalování nebo části komunálního odpadu. V neposlední řadě se dá odpad využít na stavbu ekologických domů kdy například PET lahve nebo pneumatiky naplněné jiným odpadem slouží jako náhrada za standartní stavební materiál jako jsou cihly.

## 3.2 Technologie na odstranění odpadu

I když existuje celé spektrum postupů a technologií, jak odpad využít pořád existují materiály, které se nijak využívat nedají, nebo jejich využívání nemá ekonomický smysl. Nejčastěji může jít o nebezpečné odpady nebo nevyužitelné zbytky z jiných technologií využívající odpad. Pro tyto odpady existují hlavně tyto postupy.

### 3.2.1 Spalování bez energetického využití

Tímto způsobem se likviduje jen malé množství odpadů. Hlavním cílem je zde spalováním zničit nebezpečné složky odpadu a zredukovat jeho velikost. Často se takto likviduje zdravotnický materiál.

### 3.2.2 Skládkování

Skládkování je nejstarší způsob, jak se dá odpadu zbavit. Avšak forma skládkování se oproti původnímu prostému shromažďování odpadu výrazně změnila. Principem tohoto postupu je uložit povětšinou neupravený odpad na předem vyhrazené místo. Tento přístup klade velké nároky na široké spektrum požadavků. Mezi ně se řadí výběr místa, kde se skládka nachází, typ odpadu, který je možno na skládku ukládat, množství a šířka izolačních vrstev nebo typ rekultivace krajiny po ukončení činnosti skládky [29]. Snahou v dnešní době je minimalizovat množství odpadu, který se skládky ukládá. V posledních letech se ale v ČR nedaří snižovat podíl skládkovaného odpadu ani u celkového ani u komunálního odpadu [5]. Da druhou stranu nárůst je opravdu malý.

Skládku je potřeba vnímat jako důmyslný stavební objekt, který uchovává odpad, ale také ho odděluje od okolního životního prostředí a nedovoluje mu ho kontaminovat [29]. Ve skládce vzniká řada nebezpečných plynů a kapalin z nich nejvýznamnějším plynem je metan. Zbytková voda v odpadech případně dešťová voda, která se dostane do skládky vytvoří po smíchání s rozkládajícím odpadem výluhy [30]. Jde tedy o vodu, která má ve velké koncentraci toxické látky, které by mohli kontaminovat spodní vodu. Proto je potřeba aby skládka



měla řadu ochranných prvků, které nedovolí, aby výluhy pronikli do spodní vody a které zabrání úniku metanu do ovzduší. Jednou z nejdůležitějších vrstev je spodní izolační vrstva spolu s geotextílií. Nad touto vrstvou by se měly hromadit výluhy, které jsou pomocí drenážního potrubí odváděny ze skládky [29]. Stejně podobně je tomu na povrchu skládky, která je zakonzervovaná. Zde se pod nepropustnou vrstvou hromadí metan, který je jímán ze skládky pryč. Tento plyn se dá využít v energetickém průmyslu. Hlavním zdrojem těchto problémových látek jsou biologicky rozložitelné složky odpadu. Snahou je tedy skládkovat odpad, v kterém tyto složky nejsou obsaženy [29].

Nejčastějším způsobem skládkování je na povrchu nebo těsně pod ním [30]. Při dodržení všech bezpečnostních nařízení jde o jednoduchý a relativně málo nákladný způsob, jak skládku vytvořit. Předností těchto skládek je relativně snadná sanace případně uniklých toxických látek. Později se také tato skládka dá využít jako zdroj surovin, které teď nejsme schopni využít. Druhým typem skládek jsou hlubinné skládky. Tyto skládky jsou velice náročné na provoz a jejich vybudování, ale poskytují maximální možnost ochrany před znečištěním životního prostředí [29]. S výhodou se pro vybudování tohoto zařízení používají staré doly. Uskladňuje se zde nebezpečný odpad, případně použité jaderné palivo. Posledním používaným typem skládkování je injektáž do horninového prostředí. Zbavuje se tak velkého množství zejména kapalných a plyných odpadů, které jsou díky tomuto zneškodnění nenávratně ztraceny. Jde především o mírně toxické vody z rafinerského průmyslu [29].

## 4 Moderní technologie zpracování odpadů

U zpracování velké části odpadů je technologie již plně vyvinutá a řeší se pouze její zdokonalení. Vzniká ale velká řada nových materiálů a tím pádem i velká řada nových odpadů. Hlavním problémovým materiálem na zpracování jsou plasty. Proto většina dále zmíněných postupů a technologií se zabývá zpracování odpadů v kterých je dominantní složkou plast. Kromě plastů jsou moderní technologie cíleny na nebezpečný odpad nebo na alternativní technologie.

### 4.1 Pyrolýza

Pyrolýza je proces také známý jako termická depolymerizace, v které nedochází k spalování vstupní látky. Jde o endotermní a anaerobní proces, při kterém jsou dlouhé polymerní molekuly rozkládány na kratší molekuly. Do tohoto procesu je tedy nutné dodávat poměrně velké množství energie a je potřeba zamezit nebo silně omezit přístup kyslíku. Proces se odehrává kolem teplot 300-800 °C [29]. Výstupem je směs krátkých uhlovodíků v plynné, kapalné i pevné fázi [32]. Po proběhnutí pyrolýzy se dají jednotlivé fáze separovat a různým způsobem využít. Plynná fáze je bohatá na vodík (H<sub>2</sub>) a metan který lze přeměnit na tepelnou energii [29]. V kapalné fázi je zastoupena zejména voda a směs organických látek. Pevná fáze je koksovitý materiál obsahující pevné zbytky, jako jsou drahé kovy a sklo [29]. Velký význam pro chemické složení výstupního materiálu má vstupní surovina (odpad). Proto komerční využití pyrolýzy pro velké spektrum odpadů není vhodný nástroj. S výhodou se tímto procesem dají zpracovávat nebezpečné odpady, protože proces se dá dobře hlídat a regulovat jak ze strany teplot, tak ze stran přístupu kyslíku [29].

Po samotné pyrolýze může proběhnout proces zplyňování. Tento proces je již exotermní a je zde zapotřebí působení kyslíku nebo vzduchu a teploty se zde pohybují v rozmezí 800-1500 °C [29]. Principem je reakce kyslíku s pevnými fázemi obsahující uhlík za vzniku nízko výhřevného plynu. Tak dochází k využití pevných zbytků z pyrolýzy a k výrobě dalšího plynu zvaného jako syntézní plyn [29]. Zplyňovací proces se používá k výrobě syntézního plynu z uhlí a má budoucí potenciál u biomasy.

Zajímavou úpravou pyrolýzy je katalytická depolymerizace, kterou využívá technologie ERVOeco. Jde o novou technologii vyvinutou v roce 2020 českými vědci ve spojení s firmou LogECO. Tato technologie by měla dokázat z jakéhokoliv odpadu obsahující většinou část plastů či biomasy vytvořit kapalnou směs krátkých uhlovodíků [33]. Tato směs je velice podobná směsi, která vystupuje z rafinačního procesu a je používána k polymerizaci a výrobě plastů. Mohlo by tak jít o technologii, která z širokého spektra jak tříděného, tak netříděného odpadu vytvořit plnohodnotný materiál pro opětovnou výrobu [33]. Celý proces probíhá ve třech fázích. V první fázi je vstupní materiál smíchán s katalyzátory a reagenty a dochází k jejich čištění od nebezpečných látek. V druhé fázi je materiál štěpen na krátké polymery a monomery a v třetí fázi je v dalším reaktoru tato směs přetvářena na požadovanou výstupní směs díky organické syntéze. Důležité je ale zmínit, že v této době jsou v provozu pouze 3 zařízení, a i díky novosti technologie se teprve ukáže, zdali tato technologie bude splňovat očekávané výsledky [33].

### 4.2 Plazmové technologie

Tato technologie, jak už je patrné z názvu využívá čtvrté skupenství. Plazma je vysoce reaktivní vodivý ionizovaný plyn a oproti ostatním skupenstvím se chová významně odlišně [29]. K dosažení plazmatu se používá wolframová elektroda, která emituje elektrony v natlakových plynech, jako jsou helium, argon, vodní pára, metan nebo vzduch, který je nejvhodnější pro zpracování odpadů [32]. Samotná plazma se vytváří díky kolizi vysokoenergetických částic s molekulami a třením vznikají vysoké teploty 5 000-10 000 °C [29]. Při kontaktu plazmy

s odpadem jsou molekuly odpadu štěpeny na jednoduché sloučeniny. Výstupem je syntézní plyn, v kterém je majoritně zastoupen vodík a oxid uhelnatý (CO) [34]. Podle vstupních materiálů a konkrétního použití technologie se koncentrace vodíku na výstupu mění, ale v průměru jde o 40 % [34]. Z ekonomického hlediska jde o technologii s drahým provozem, a proto se používá jen u některých materiálů. Její hlavní předností je likvidace toxických a nebezpečných materiálů [29].

### 4.3 MFC

Tato zkratka je z anglického microbial fuel cell a jde o palivový článek, který pro svoji funkci využívá metabolismus mikroorganismů. Jde o relativně novou technologii, která umožňuje z kapalných odpadů a ze znečištěných vod generovat elektrickou energii [35]. Mikroorganismy přeměňují organickou část odpadu pomocí svého metabolismu na elektřinu a zároveň rozkládají toxické látky [35]. Prostor palivového článku tvoří tři části. Katoda, anoda s proudící kapalinou obsahující mikroorganismy a přepážková membrána [36]. V anodové části metabolismus mikroorganismu vytváří protony a elektrony. Reakce se nenechá dokončit a volné elektrony se odebírají na katodovou část a článek produkuje elektrickou energii. Volné protony se na katodové straně účastní redukce a zde vznikají molekuly vody [36]. Nespornou výhodou této technologie je její dominance na poli šetrnosti k životnímu prostředí, kde spolu s technologií MEC (microbial electrolysis cell) hrají prim [37]. Bohužel tato technologie zatím nemá mnoho praktických využití, protože její výkon, ekonomické výnosy a množství zpracovaného odpadu není dostatečné [35]. V blízké budoucnosti by ale tato technologie mohla najít své místo mezi konvenčními technologiemi.

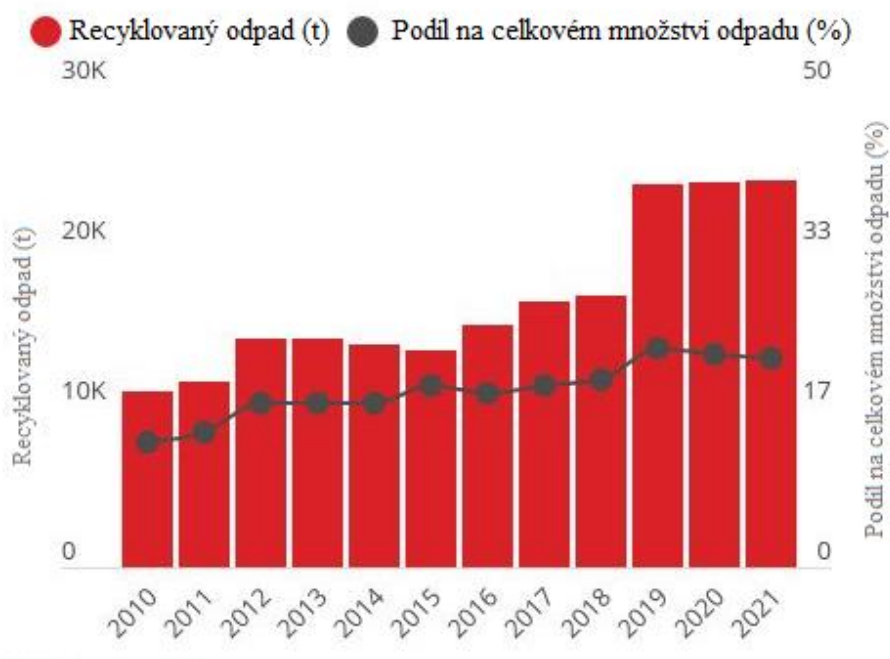
## 5 Výpočtový model uhlíkové stopy města Brna

### 5.1 Zpracování odpadů v Brně

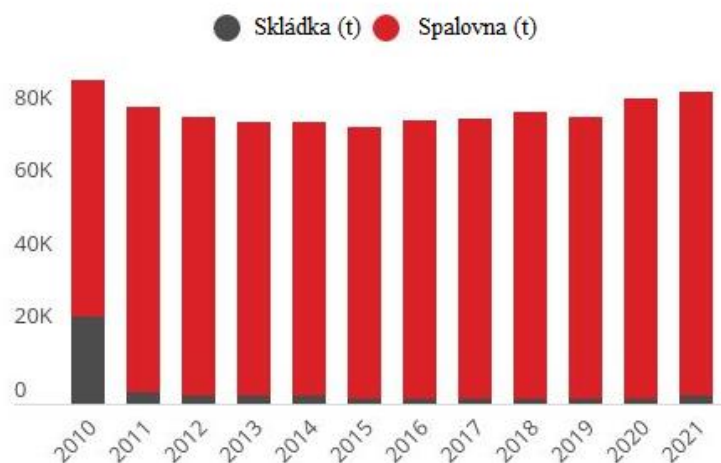
V městě Brně je za nakládání s odpady zodpovědné statutární město Brno. Ve vlastnictví města Brna je společnost SAKO, která se zabývá svozem, zpracováním a využitím odpadů. Tento odpad je komunálního typu, takže jde o odpad, který pochází z domácností obyvatel nebo jde o odpad, který vzniká na území obce a má původ v činnosti fyzických osob. Komunální odpad je shromažďován v kontejnerech a popelnicích v blízkosti působiště obyvatel. Takto dochází díky vlastnímu přičinění obyvatel k primárnímu třídění komunálního odpadu na pár vybraných složek, které se dají samostatně zpracovávat. Následně je odpad odvážen popelářskými vozy a je dopravován k místům na dotřídění a zpracování. Dochází tak k oddělení od směsného komunálního odpadu. Selektované odpady jsou plasty, papír, kov, sklo, textil, elektronický odpad, nebezpečný odpad a od března 2021 nově také bioodpad [38]. Kromě standardních popelnic po Brně funguje 37 sběrných dvorů, kam je možné dovážet objemný nebo druhově rozličný odpad. Pro sběr nepoužitých a prošlých léčiv mohou občané využívat jakékoliv lékárny, která tyto léčiva shromažďuje a následně poskytuje na vhodné zpracování [38].

Vytřízené využitelné složky komunálního odpadu jsou recyklovány. Ostatní složky jsou většinou energeticky využívány v Brněnském ZEVO v Modřicích. Zde se brněnský odpad přeměňuje na teplo a elektrickou energii. Po spálení odpadu zůstane v kotli škvára, která se používá jako stavební materiál, pokud je dobrá její kvalita [39]. Část odpadu je skládkováno, ale jde o minimální množství. Hodnoty zpracovaných odpadů jsou vidět Obr. 4 a Obr. 5.

Nově sbíraný bioodpad je sbírán ze všech sběrných dvorů dále z vybraných městských částí, kde přibýly hnědé popelnice na bioodpad (Brno-jih, Bohunice, Černovice, Jundrov, Kníničky, Kohoutovice, Komín, Medlánky a Žabovřesky) a od rodinných domů z oblasti Stránice. Tento vytřízený odpad je používán v centrální kompostárně Brno na výrobu kompostu. Nevytřízený odpad, který je obsažen v směsném komunálním odpadu je energeticky využíván v ZEVO [39]. Z celostátní produkce odpadů podle Českého statistického úřadu [5] vyplívá, že obsah bioodpadu v komunálním odpadu je za rok 2020 zhruba 20,7 %.



Obr. 4: Množství recyklovaného odpadu a procentuální vyjádření z celkového množství odpadu v Brně [40]



Obr. 5: Množství spalovaného a skládkovaného odpadu v Brně [40]

## 5.2 Výpočet uhlíkové stopy

Zpracování v Brně má svůj zaběhlý systém, ať už se to týká spalování nebo recyklace. Díky tomu je reálná implementace nových technologií do zaběhnutého systému poměrně náročná. Jisté inovace by se ale mohly vnést do nakládání s bioodpadem. Jeho nové sbírání a třídění by se dalo využít i jako zdroj pro energetické využití. Místo kompostování by se mohl bioodpad začít zpracovávat anaerobní digescí. Pro tuto změnu je potřeba, aby nový typ zpracování převyšoval starý způsob v některých aspektech jako je ekonomický výnos a ekologičnost (uhlíková stopa). Pro určení ekologického porovnání obou technologií se použijí vztahy z kapitoly 2.3. K výpočtu jsou potřeba data o množství vysbíraného bioodpadu, které poskytla firma SAKO. Díky těmto datům získaných konkrétně od Ing. Romany Ondráškové a od Ing. Moniky Mademli je možné provést výpočet emisí a uhlíkové stopy pro uvažované typy zpracování. Jde o aktuální data (viz Tab. 4 a Tab. 5), která zatím v běžných statistických zprávách nejsou dostupná.

Tab. 4: Množství bioodpadu v tunách z Brna za rok 2021 – zdroj SAKO Brno

rok	měsíc	SSO	sběrový dny v Brně	svoz z ulic města Brna	svoz ze Stránic	živnostníci Brno	Celkem
2021	leden	52,7	0	0	3,22	0	55,94
	únor	66,8	0	0	3,66	0	70,42
	březen	283	29,79	0	13,42	0	326,49
	duben	297	39,26	21,18	15,38	0	373,31
	květen	272	35,33	88,31	16,86	0,288	412,828
	červen	291	34,59	110,752	28,26	0,378	464,56
	červenec	338	20,46	106,828	18,02	0,432	483,59
	srpen	379	21,28	116,534	18,66	0,396	535,99
	září	320	39,84	120,65	18,02	3,56	502,39
	říjen	340	52,8	120,29	17,79	3,38	533,92
	listopad	373	51,79	106,91	14,8	3,18	549,33
	prosinec	42,8	1,48	43,19	5,68	1,92	95,03
<b>Celkem</b>		<b>3055</b>	<b>326,6</b>	<b>834,644</b>	<b>173,77</b>	<b>13,534</b>	<b>4403,798</b>

Tab. 5: Množství bioodpadu v tunách z Brna za rok 2022 – zdroj SAKO Brno

rok	měsíc	SSO	sběrový dny v Brně	svoz z ulic města Brna	svoz ze Stránic	živnostníci Brno	Celkem
2022	leden	76	0	73,4	3,86	1,53	154,8
	únor	136	0	74,4	6,62	1,93	219,43
	březen	338	31,84	85,79	12,15	2,17	469,93
<b>Celkem</b>		<b>550</b>	<b>31,84</b>	<b>233,59</b>	<b>22,63</b>	<b>5,63</b>	<b>844,16</b>

K samotnému výpočtu se použije rovnice 2 s využitím hodnot koeficientů  $E_c$  (viz. Tab. 2 a Tab. 3) a dat o bioodpadu (viz Tab. 4 a Tab. 5). Následným dosazením se vypočítá uhlíková stopa pro jednotlivé typy zpracování. Kromě využití více zdrojů pro jednotlivé  $E_c$  koeficienty budou uvažovány dva rozdílné scénáře. V prvním scénáři se bude počítat a brát v úvahu pouze reálné hodnoty vyříděného bioodpadu za posledních 12 měsíců z poskytnutých dat od společnosti SAKO. To za uvažované období činí zhruba 4,8 tisíc tun bioodpadu. Vypočítá se tak reálná uhlíková stopa vyříděného bioodpadu v Brně za jeden rok.

V druhém scénáři se bude uvažovat celkový potenciál bioodpadu v Brně za rok 2021. Kromě reálně vyříděného bioodpadu se bude také počítat s biodegradabilní složkou komunálního odpadu. Pro stanovení hmotnosti této složky se použije procentuální zastoupení bioodpadu v komunálním odpadu (20,7 % [5]) pro Českou republiku. Toto zastoupení je vypočítané z komunálního odpadu, ze kterého se zatím nesePARoval, jako je tomu teď v Brně. Aby došlo k minimální chybě, bylo zapotřebí vyříděný bioodpad za rok 2021 prvně přičíst do komunálního odpadu za rok 2021, tak aby vznikl fiktivní komunální odpad, který svým složením odpovídá komunálnímu odpadu bez separace bioodpadu. Pro tento fiktivní komunální odpad už je relevantní použít procentuální zastoupení 20,7 %. Po vynásobení celkového komunálního odpadu procentuálním zastoupením bylo získáno množství bioodpadu vyskytující se ve fiktivním komunálním odpadu. K tomuto množství se připočítala hmotnost vyříděného bioodpadu z SSO za rok 2021, který se nikdy v komunálním odpadu nevyskytoval. Po sečtení těchto množství byla zjištěna celková hmotnost bioodpadu v celkovém brněnském odpadu za rok 2021, která činí zhruba 26,3 tisíc tun.

Pro každý scénář zvlášť byl proveden výpočet a výsledné hodnoty uhlíkové stopy pro jednotlivé typy zpracování jsou v Tab. 6 a Tab. 7.

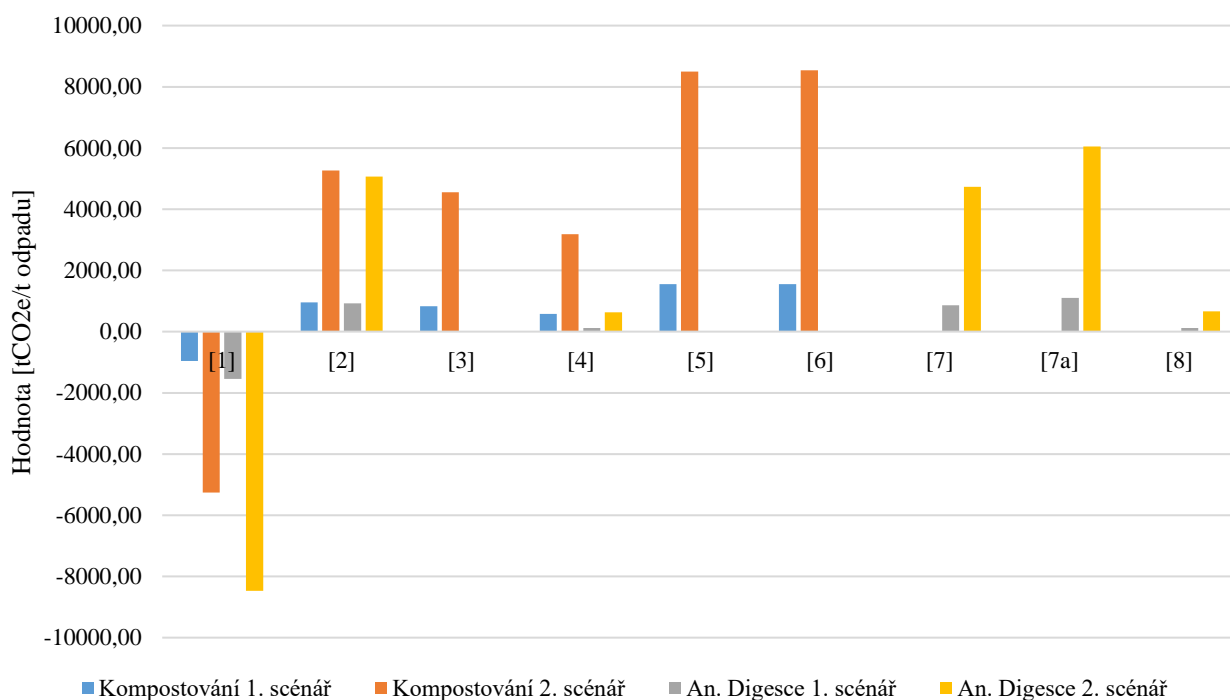
Tab. 6: Hodnoty uhlíkové stopy pro kompostování

Zdroj	Celková uhlíková stopa – scénář 1 [tCO <sub>2e</sub> ]	Celková uhlíková stopa – scénář 2 [tCO <sub>2e</sub> ]	Obr. 6
Orner et al. [24]	-959,0216	-5260,703515	[1]
CI2, o. p. s. [25]	959,0216	5260,703515	[2]
Blengini [26]	637,749 až 1021,358	3498,368 až 5602,649	[3]
Vieira et al. [27]	14,385 až 1160,416	78,911 až 6365,451	[4]
White et al. [28]	1548,819884	8496,036177	[5]
ADME [28]	1371,401 až 1740,624	7522,806 až 9548,177	[6]

Tab. 7: Hodnoty uhlíkové stopy pro anaerobní digesce

Zdroj	Celková uhlíková stopa – scénář 1 [tCO <sub>2</sub> e]	Celková uhlíková stopa – scénář 2 [tCO <sub>2</sub> e]	Obr. 6
Orner et al. [24]	-1544,024776	-8469,732659	[1]
CI2, o. p. s. [25]	0 až 1846,117	0 až 10126,854	[2]
IPPC [28]	119,8777	657,5879394	[8]
Jeongt et al. [28]	863,11944	4734,633164	[7]
Based on Jeongt et al. [28]	1102,87484	6049,809042	[7a]
Vieira et al. [27]	0 až 230,1652	0 až 1262,569	[4]

Výsledné hodnoty uhlíkové stopy pro jednotlivé způsoby zpracování jsou vykresleny v grafu (viz Obr. 6). U zdrojů, kde se hodnoty EF pohybují v nějakém rozmezí, byly pro vykreslení grafu vzaty průměry hodnot EF. Po podrobném prozkoumání grafu se dá poměrně dobře určit, že anaerobní digesce v obecném měřítku z obou metod vytváří méně emisí.



Obr. 6: Uhlíkové stopy podle jednotlivých zdrojů EF a na základě scénářů 1 a 2

## DISKUSE

Cílem práce je kromě jiného navrhnout inovativní způsob nakládání s odpady pro Brno. Díky podrobné rešerši bylo možné zhodnotit, které možnosti inovací pro město Brno budou možné a budou mít reálný potenciál. V prvním kroku bylo rozhodnuto, že pro inovaci bude vhodné zaměřit se na zpracování bioodpadu, a to buď anaerobní digesí nebo kompostováním. Data o bioodpadu v Brně byly získány od společnosti SAKO. Následným výpočtem v kapitole 5 byly stanoveny uhlíkové stopy jednotlivých typů zpracování. Z výsledných vypočítaných hodnot uhlíkových stop není na první pohled zřejmé, která z metod zpracování bioodpadu vychází z ekologického hlediska lépe. Je to způsobeno několika faktory. Hlavním důvodem je fakt, že použité hodnoty EF jsou z různých studií a metodik, které nemají jednotný postup při určování EF. Některé studie pracují pouze na kladné škále hodnot EF, takže nejlepší možná hodnota je nula. V jiných studiích ale vystupují také záporné hodnoty EF, kde je záporným znaménkem zdůrazněný fakt, že daný typ posuzované činnosti naopak snižuje množství skleníkových plynů. Konkrétně u bioodpadu se uvažuje se záporným koeficientem kvůli vázání uhlíku do biomasy při jejím růstu. Tak se ve výsledku může stát, že některý proces má záporný koeficient. Dalším faktorem je různorodost metodik z hlediska započítávání některých skleníkových plynů a míry započítávání sekundárních a terciálních emisí. Proto výsledky nedávají jednotný obrázek o míře škodlivosti či ekologičnosti daných procesů. Po podrobnějším zkoumání výsledků a zohlednění všech zdrojů se dá soudit, že anaerobní digesce vytváří v průměru třikrát méně skleníkových plynů než kompostování. Pokud by se ale konkrétně porovnávaly jednotlivé hodnoty uhlíkové stopy, tak ve vybraných hodnotách by se mohlo stát, že kompostování vychází naopak násobně lépe než anaerobní digesce. Proto je potřeba u uhlíkové stopy neporovnávat jen některé vybrané hodnoty, ale sledovat celý výstup globálně. Ideálním nástrojem je metodika, v které se nachází emisní faktory obou posuzovaných metod. Takovýmto dokumentem je například review [28], které obsahuje shrnutí jak pro kompostování, tak pro anaerobní digesce. Nejlepším možným řešením by bylo experimentálně určit hodnoty EF při stejných vstupních podmínkách a při jednotné metodice. Pro vytvoření obrázku o rozdílnosti obou metod toto není potřeba a použití obecných hodnot EF je dostačující. Je ale potřeba mít na paměti, že hodnoty vypočítaných uhlíkových stop jsou pouze z hrubých dat a nedají se brát jako exaktní výsledky.

U srovnání scénářů 1 a 2 by se na první pohled mohlo zdát, že jediný rozdíl mezi nimi je adekvátně zvětšené množství uhlíkové stopy kvůli nárůstu uvažovaného odpadu. Pokud by se ale povedlo přiblížit k scénáři 2, tak dalším pozitivním aspektem by bylo zvýšení homogeneity komunálního odpadu, což by přímo vedlo k lepšímu spalování a tím pádem i k nižší produkci skleníkových a toxických plynů. Tak by bylo docíleno i lepšího výtěžku energie při energetickém využívání a samotný proces by se dal lépe regulovat. Navíc, pokud komunální odpad nekončí v spalovně, ale na skládce, tak absence biologické složky odpadu výrazně snižuje problémovost skládkování, a to hlavně díky snížení produkce odpadního metanu a toxických výluh. Vlastní zpracování komunálního odpadu by tedy snížilo svoji uhlíkovou stopu právě zásluhou vyšší separace bioodpadu z komunálního odpadu. Toto snížení uhlíkové stopy by se dalo promítnout i k oběma uvažovaným způsobům zpracování bioodpadu.

Na základě výsledných hodnot se zdá, že z ekologického hlediska je pro zpracování bioodpadu vhodnější použití anaerobní digesce. Pro reálné použití těchto závěrů v praxi by bylo třeba zhodnotit i jiné faktory. Prvním takovým významným faktorem je ekonomická rentabilita. Kompostování je svým provedením poměrně nenáročná technologie, která nepotřebuje velké finanční investice pro její zavedení a provozování. To se ale u anaerobní digesce poměrně mění. Bylo by potřeba vybudovat nebo začít využívat zařízení, které tento proces zvládne. To by vedlo k vyšším vstupním investicím. Samotná výstavba nového zařízení by negativně upravila hodnoty produkovaných emisí kvůli sekundárním a terciálním vlivům,



kteřé by se promítly v celkové uhlíkové stopě tohoto konkrétního procesu. Navíc konečným produktem u kompostování je hodnotné hnojivo, které může přinášet ekonomické zisky v podobě jeho prodeje nebo ekonomické úspory při vlastním použití. Anaerobní digesce produkuje plyny, které se dají dobře energeticky využít jako zdroj tepla a elektrické energie, vedoucí k přínosnému ekonomickému využití. Obzvláště při energetické krizi je využití odpadu jako zdroje energie zajímavou alternativou. Proto by pro praktické využití bylo potřeba komplexně zvážit vstupní investice, logistiku a návratnost obou provozů.

Při určování celkového množství bioodpadu, vyskytujícího se v Brně, byly zahrnuté předpoklady, které jsou diskutabilní. Prvním takovým předpokladem bylo procentuální zastoupení bioodpadu v komunálním odpadu, které bylo převzaté z celorepublikového součtu, nikoliv z brněnského přehledu. Tato data bohužel nebyla k dispozici, ale dá se předpokládat, že odchylka od celorepublikového vzorku nebude v rámci výpočtů hrát velkou roli. Jedná se o hrubý výpočet a ovlivnění výsledku by mělo být nepodstatné. Dalším předpokladem je, že procentuální zastoupení je bráno z přehledu z roku 2019, i když výpočet v Brně byl proveden pro rok 2021. Na základě vývoje odpadů se dá předpokládat [5], že složení komunálních odpadů se nijak významně nezměnilo. Ideální by bylo provést aktuální měření výskytu bioodpadu v komunálním odpadu v Brně pro získání konkrétních a aktuálních dat. Opět se s jistotou předpokládat, že tyto zanedbané vlivy nebudou mít veliký význam pro hrubý výpočet s cílem dát základní podněty a rámce o možnostech zpracování bioodpadu v Brně.

Je zřejmé, že vzhledem k očekávané rostoucí míře separace bioodpadu dává jeho využití jakožto zdroje cenných surovin smysl. Pokračováním v debatách na toto téma se může docílit hodnotných ekologických a ekonomických změn.

## ZÁVĚR

Na základě rešerše na téma stanovení uhlíkové stopy pro moderní technologie zpracování odpadů lze konstatovat, že odpadové hospodářství spolu s uhlíkovou stopou je velice aktuálním tématem s řadou úskalí, které není jednoduché rozhodnout. V rámci ČR i celé EU je snahou přejít v rámci odpadového hospodářství na oběhové hospodářství. Tento koncept zahrnuje důkladné plánování zrodu výrobku, jeho následný život, a hlavně jeho možnost opětovného použití či jeho vhodné zpracování v rámci odpadové politiky. Tímto způsobem je snahou minimalizovat množství vyprodukovaného odpadu, i když v posledních letech je trend spíše pomalu rostoucí. Je to z důvodů zvyšující se populace, vedení konzumního stylu života u populace atd. Pokud nejsme schopni zabránit vzniku odpadu je potřeba s ním dobře zacházet a snažit se z něj vytěžit maximum.

V rámci odpadové politiky je všemi možnými cestami společnost tlačena k snižování ukládání odpadů na skládky a zároveň přicházet s technologiemi a koncepty, které odpad neberou jako koncový produkt, ale jako zdroj surovin pro další zpracování. V ideálním případě je vhodné odpad recyklovat, ale to obzvlášť kvůli časté nehomogenitě odpadu není vždy možné, a proto se ve velké míře také využívá energetické zpracování odpadu na výrobu tepla a elektrické energie. Důležitou roli hraje i zasypávání především u stavebního odpadu a nemalou roli má také kompostování a anaerobní digesce u zpracování bioodpadů. Samozřejmě skládky mají stále svůj význam, ale pokud je jiná možnost, je snahou se jim vyhnout. Svě opodstatněné využití mají skládky například pro nebezpečné a těžce zpracovatelné odpady. Tyto metody a technologie společně tvoří komplexní nástroj pro využívání a likvidaci odpadu.

Výše zmíněné technologie nejsou samozřejmě jedinými dostupnými technologiemi, ale mají spíše roli majoritních stabilních způsobů. Do nekonvenčních či moderních metod se dají zařadit technologie využívající specifické chemicko-fyzikální principy, jako je pyrolýza nebo plazmová technologie. Tyto technologie jsou poměrně energeticky náročné, a proto se nepoužívají pro zpracování všech odpadů. Pro specifické typy odpadů je jejich použití opodstatněné díky efektivnímu energetickému a materiálovému využití. Velice zajímavou technologií je MFC, která je zatím v plenkách, ale nabízí značný potenciál pro zpracování kapalných a plyných odpadů s bonusem výroby elektrické energie. V komerčním prostoru zatím nemá využití, ale s budoucím výzkumem může být vysoký potenciál tohoto způsobu zpracování naplněn.

Dobrým nástrojem nejen pro hodnocení ekologické stránky zpracování odpadu je v dnešní době populárně vnímaná uhlíková stopa, která stanovuje množství emisí skleníkových plynů při jednotlivých procesech. Její výpočet ovšem není vždy jednoduchý a náhled na její stanovení nemá vždy jednotnou metodiku, a proto je potřeba brát uhlíkovou stopu jako porovnávací nástroj, a ne jako exaktní měřítko. V takovém případě je uhlíková stopa přehledným a pro veřejnost srozumitelným způsobem, kterým se dají poměřovat různé technologie, procesy a vize.

Město Brno má dobře vypracovaný systém svozu odpadu i jeho následného zpracování, obzvlášť díky brněnské spalovně odpadu v Modřicích. Co se týče návrhu pro město Brno, je podle provedené rešerše prozatím prostor pro inovace a moderní technologie u nově sbíraného bioodpadu. Ten je zatím zpracováván kompostováním, ale dle výpočtů by mohl být v budoucnu zpracováván anaerobní digescí. Díky datům poskytnutým brněnskou společností SAKO byla vypočítána uhlíková stopa obou procesů a navzájem byly tyto procesy porovnány. Z ekologického hlediska se jeví anaerobní digesce jako lepší způsob zpracování bioodpadu, ale je důležité zmínit, že v rámci této práce nejsou zahrnuty všechny další podstatné aspekty, které by bylo potřeba před nasazením této technologie vyřešit.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FIEDOR, Jiří. *Odpadové hospodářství I: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2012 [cit. 2021-11-23]. ISBN 978-80-248-2573-1.
- [2] *Biela kniha energetického zhodnocovania odpadov v slovenskej republike*. Bratislava: Ewia, 2020. ISBN 978-80-570-2270-1.
- [3] PLEVOVÁ, Aneta. *Cirkulární ekonomika v ČR v kontextu strategie EU* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/gb1pnt/>. Diplomová práce. Vysoká škola ekonomická v Praze. Vedoucí práce Ingeborg Němcová.
- [4] Zelená dohoda pro Evropu. *Internetové stránky Evropské komise* [online]. Generální ředitelství pro komunikaci, 2022 [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_cs](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs)
- [5] *Produkce, využití a odstranění odpadů v roce 2020: Generation, recovery and disposal of wastes in 2020*. Praha: Český statistický úřad, 2021. Životní prostředí, zemědělství. ISBN 978-80-250-3187-2.
- [6] *The Science of Waste*. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4RN: CRC Press, 2022. ISBN 978-1-032-17214-9.
- [7] Katalog odpadů 2021. *Katalog odpadů* [online]. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.katalogodpadu.cz/#top>
- [8] *Nariadenie Komise (EÚ) č. 1357/2014 ze dne 18. prosince 2014, kterým se nahrazuje příloha III směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic Text s významem pro EHP*. In: EUR-Lex [právní informační systém]. Úřad pro publikace Evropské unie [cit. 17. 2. 2022]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1357&from=SK>
- [9] *VÝVOJ OBYVATELSTVA V KRAJÍCH ČESKÉ REPUBLIKY* [online]. 2020. 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/vyvoj-obyvatelstva-v-krajich-ceske-republiky-2020>
- [10] *Produkce a nakládání s odpady v roce 2020* [online]. 2020. 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady\\_podrubrika/\\$FILE/OODP-Produkce\\_a\\_nakladani\\_2020-20211029.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady_podrubrika/$FILE/OODP-Produkce_a_nakladani_2020-20211029.pdf)
- [11] *Odpady*. Ministerstvo životního prostředí [online]. Vršovická 1442/65 100 10 Praha 10: Ministerstvo životního prostředí, 2020 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/odpady\\_podrubrika](https://www.mzp.cz/cz/odpady_podrubrika)
- [12] HOUGHTON, John. Global warming. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2005, **68**(6), 1343-1403 [cit. 2022-02-27]. ISSN 0034-4885. Dostupné z: doi:10.1088/0034-4885/68/6/R02
- [13] *Zákon 73/2012 Sb., o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech*. In: Poslanecká sněmovna: Česká republika, 2012. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=73&r=2012>
- [14] MATUŠTÍK, Jan a Vladimír KOČÍ. *What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators*. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **285** [cit. 2022-04-18]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124833
- [15] *Web ČT24: Asijské země vrací Západu kontejnery s odpadem. Nejsme skládkou světa, bouří se Filipínci* [online]. Česká televize, 2019 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/2830394-asijske-zeme-vraci-zapadu-kontejnery-s-odpadem-nejsme-skladkou-sveta-bouri-se-filipinci>
- [16] KEYUAN, Zou. Regulation of waste dumping at sea: *The Chinese practice*. *Ocean & Coastal Management* [online]. 2009, **52**(7), 383-389 [cit. 2022-04-20]. ISSN 09645691. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ocecoaman.2009.04.002

- [17] Pavel Noskiewicz: *Energetická zamyšlení*. CzechIndustry [online]. Praha: STUDIO P+P s.r.o, 2011 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.casopisczechindustry.cz/products/pavel-noskiewicz-energeticka-zamysleni/>
- [18] DING, Grace Kam Chun a Saeed BANIHASHEMI. *Ecological and Carbon Footprints—The Future for City Sustainability*. Encyclopedia of Sustainable Technologies [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 43-51 [cit. 2022-04-18]. ISBN 9780128047927. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10175-7
- [19] TŘEBICKÝ, Viktor. *Metodika stanovení uhlíkové stopy podniku*. Rudná: CI2, 2016. ISBN 978-80-906341-3-8.
- [20] PINAULT, Jean-Louis. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing: *Positive Feedbacks*. *Journal of Marine Science and Engineering* [online]. 2018, **6**(4) [cit. 2022-04-20]. ISSN 2077-1312. Dostupné z: doi:10.3390/jmse6040146
- [21] HOPAN, František. *Emisní faktory ze spalování tuhých paliv ve spalovacích zařízeních malých výkonů*. Ostrava, 2010. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [22] MARTIN, Meredith P., David J. WOODBURY, Danica A. DOROSKI, Eliot NAGLE, Michael STORACE, Susan C. COOK-PATTON, Rachel PASTERNAK a Mark S. ASHTON. *People plant trees for utility more often than for biodiversity or carbon*. *Biological Conservation* [online]. 2021, **261** [cit. 2022-04-20]. ISSN 00063207. Dostupné z: doi: 10.1016/j.biocon.2021.109224
- [23] JESWANI, Harish K., Rachele W. SMITH a Adisa AZAPAGIC. Energy from waste: carbon footprint of incineration and landfill biogas in the UK. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2013, **18**(1), 218-229 [cit. 2022-05-01]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-012-0441-8
- [24] ORTNER, Maria E, Wolfgang MÜLLER a Anke BOCKREIS. The greenhouse gas and energy balance of different treatment concepts for bio-waste. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* [online]. 2013, **31**(10\_suppl), 46-55 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X13500518
- [25] LUPAČ, Miroslav, Josef NOVÁK a Viktor TŘEBICKÝ. *Uhlíková stopa města: metodika pro stanovení místního příspěvku ke klimatické změně*. Praha: Týmová iniciativa pro místní udržitelný rozvoj, 2012. ISBN 978-80-87549-05-6.
- [26] BLENGINI, Gian Andrea. Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2008, **52**(12), 1373-1381 [cit. 2022-05-07]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi: 10.1016/j.resconrec.2008.08.002
- [27] VIEIRA, Victor Hugo Argentino de Moraes a Dácio Roberto MATHEUS. Environmental assessments of biological treatments of biowaste in life cycle perspective: A critical review. *Waste Management & Research* [online]. 2019, **37**(12), 1183-1198 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X19879222
- [28] WALLING, Eric a Céline VANEECKHAUTE. Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. *Journal of Environmental Management* [online]. 2020, **276** [cit. 2022-05-07]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111211
- [29] KURAS, Mečislav. *Odpady a jejich zpracování*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2014. ISBN 978-80-86832-80-7.
- [30] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTĚZ a Petr TRÁVNÍČEK. *Technika pro zpracování odpadů*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-207-6.
- [31] PERIYASAMY, Selvakumar, Tatek TEMESGEN, V KARTHIK, J BEULA ISABEL, S KAVITHA, J RAJESH BANU a P SIVASHANMUGAM. *Wastewater to biogas re-*

- covery. Clean Energy and Resource Recovery [online]. Elsevier, 2022, 2022, s. 301-314 [cit. 2022-04-20]. ISBN 9780323901789. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-90178-9.00029-9
- [32] BASU, Prabir. *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Amsterdam: Elsevier, c2010. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [33] *ERVO ECO* [online]. Praha: LOGeco, 2020 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.ervoeco.com/cs/technologie>
- [34] ISMAIL, Norasyikin a Farid Nasir ANI. *A Review on Plasma Treatment for the Processing of Solid Waste*. Jurnal Teknologi [online]. 2015, **72**(5) [cit. 2022-04-18]. ISSN 2180-3722. Dostupné z: doi:10.11113/jt.v72.3938
- [35] TEIXEIRA, E.R., A. CAMÕES a F.G. BRANCO. Valorisation of wood fly ash on concrete. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2019, **145**, 292-310 [cit. 2022-04-18]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.028
- [36] ROY, S., S. MARZORATI, A. SCHIEVANO a D. PANT. *Microbial Fuel Cells*. Encyclopedia of Sustainable Technologies [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 245-259 [cit. 2022-04-18]. ISBN 9780128047927. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10122-8
- [37] TETTEH, E.K., M.O. AMANKWA, C. YEBOAH a M.O. AMANKWA. Emerging carbon abatement technologies to mitigate energy-carbon footprint – a review. *Cleaner Materials* [online]. 2021, **2** [cit. 2022-04-20]. ISSN 27723976. Dostupné z: doi: 10.1016/j.clema.2021.100020
- [38] *Brno v číslech* [online]. 17. Brno: Magistrát města Brna, 2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: [https://www.brno.cz/fileadmin/user\\_upload/sprava\\_mesta/magistrat\\_mesta\\_brna/OVV/Publikace/Brno\\_v\\_cislech/Brno\\_v\\_cislech\\_2016.pdf](https://www.brno.cz/fileadmin/user_upload/sprava_mesta/magistrat_mesta_brna/OVV/Publikace/Brno_v_cislech/Brno_v_cislech_2016.pdf)
- [39] *SAKO Brno* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.sako.cz/>
- [40] Data.Brno. *Dlouhodobě sledované statistiky města* [online]. Brno: Magistrát města Brna, 2021 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://data.brno.cz/pages/zivotni-prostredi>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
AR5	Pátá hodnotící zpráva IPCC	-
CNC	Halogenderiváty uhlovodíků	-
CO	Oxid uhelnatý	-
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	-
CO <sub>2e</sub>	Ekvivalent oxidu uhličitého	CO <sub>2</sub>
CO <sub>2ekv</sub>	Ekvivalent oxidu uhličitého	CO <sub>2</sub>
ČR	Česká republika	-
EF	Emisní faktor	CO <sub>2</sub> /J
EU	Evropská unie	-
GWP	Potenciál globálního ohřevu	-
H <sub>2</sub>	Vodík	-
H <sub>2</sub> O	Vodní pára	-
CH <sub>4</sub>	Metan	-
IPCC	Mezivládní panel pro změnu klimatu	-
MEC	Microbial electrolysis cell	-
MFC	Microbian fuel cell	-
N <sub>2</sub> O	Oxid dusný	-
O <sub>2</sub>	Kyslík	-
O <sub>3</sub>	Ozon	-
PET	Polyethylentereftalát	-
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadů	-

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Porovnání lineárního a oběhového hospodářství [2].....	11
Obr. 2: Nakládání s komunálním odpadem v České republice, [5].....	21
Obr. 3: Celkové nakládání s odpady v České republice, [5] .....	21
Obr. 4: Množství recyklovaného odpadu a procentuální vyjádření z celkového množství odpadu v Brně [40].....	28
Obr. 5: Množství spalovaného a skládkovaného odpadu v Brně [40].....	29
Obr. 6: Uhlíkové stopy podle jednotlivých zdrojů EF a na základě scénářů 1 a 2.....	31

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Přehled vybraných skleníkových plynů [19].....	18
Tab. 2: Uhlíková stopa kompostování bioodpadu.....	20
Tab. 3: Uhlíková stopa anaerobní digesce bioodpadu.....	20
Tab. 4: Množství bioodpadu v tunách z Brna za rok 2021 – zdroj SAKO Brno.....	29
Tab. 5: Množství bioodpadu v tunách z Brna za rok 2022 – zdroj SAKO Brno.....	30
Tab. 6: Hodnoty uhlíkové stopy pro kompostování .....	30
Tab. 7: Hodnoty uhlíkové stopy pro anaerobní digesci.....	31