

WP 1.F Národní monitoring oběhového hospodářství

Souhrnná výzkumná zpráva

Přístup k modelování toku odpadů na území ČR (V1.F.2.1, V64)

Kolektiv autorů:

Ing. Radovan Šomplák, Ph.D.
Ing. Jaroslav Pluskal
doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

Ing. Jiří Valta

Řešitelské pracoviště:

Ústav procesního inženýrství, VUT v Brně,
CENIA, česká informační agentura životního prostředí
Březen 2022

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Prostředí pro život.



Konečný uživatel výsledků: **Ministerstvo životního prostředí**

Vršovická 1442/65

Praha 10, 100 10

Název projektu: Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost CEVOOH

Číslo projektu: CEVOOH SS02030008

Řešitel projektu: Česká informační agentura životního prostředí (CENIA)

Moskevská 1523/63, Praha 10, 101 00

Doba řešení: 2021 až 2026

Cíl projektu: Cílem projektu je vybudování dlouhodobě pracující, odborné, interdisciplinární, výzkumné základny tvořené klíčovými výzkumnými organizacemi disponujícími expertízou a odbornou kapacitou pro provádění výzkumu v oblasti odpadového a oběhového hospodářství v širších souvislostech. Centrum bude poskytovat Ministerstvu životního prostředí, dalším resortům, odborným platformám a dalším subjektům výsledky výzkumu, rozšiřování vědeckých poznatků a expertní podporu při tvorbě politik, strategií a regulací. Centrum tvořené konsorciem osmi výzkumných organizací a univerzit je zaměřeno na provádění výzkumu v tematických oblastech souvisejících s přechodem České republiky z lineárního na cirkulární hospodářský model. Tento přechod vyžaduje výzkum v nových, dosud neřešených oblastech, jakými jsou například materiálové toky surovin, inovativní technologie zaměřené na minimalizaci použití primárních surovin ve výrobě, maximální materiálovou využitelnost a využívání odpadů, vedlejších produktů a meziproduktů, ekodesign produktů, sledování a vyhodnocování nejen environmentálních, ale také sociálně-ekonomických procesů. Hlavními tematickými oblastmi, na které se Centrum v rámci své činnosti zaměří, jsou odpadové a oběhové hospodářství, monitoring a rozvoj nových monitorovacích nástrojů sledování přechodu k oběhovému hospodářství, včetně vývoje nových indikátorů, analýza životní cyklu výrobků, ekodesign, problematika kontaminace prostředí z hlediska technologií, nově se vyskytujících polutantů, využití nových metod a přístupů k identifikaci a odstranění znečištění, např. prostřednictvím dálkového průzkumu země. Neopominutelným tématem je také oblast environmentální bezpečnosti, prevence závažných havárií a tím související témata kybernetické bezpečnosti a společenské přijatelnosti environmentálně a technologicky podmíněných. Činnost Centra propojuje přírodovědné, technické a humanitní obory v jedné interdisciplinární platformě s cílem posunout ČR blíže k oběhovému hospodářství.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

Obsah

1	Úvod	4
2	Historie a současný stav vývoje.....	9
3	Požadavky na data	10
4	Legislativní zakotvení	10
5	Princip nástroje REVEDATO	11
6	Navrhované typy úloh.....	18
7	Příklady aplikace	19
7.1	Kaly z čištění komunálních odpadních vod (WP 1.B.4)	20
	Příloha 1	21

1 Úvod

Jedním z dlouhodobých cílů WP1F je modelování budoucího vývoje nakládání s různými odpady na území ČR. Modelování musí začínat maximálním porozuměním současného stavu. Kde odpad vzniká, kam je transportován, kde je transformován do jiných forem a kde dochází k jeho finálnímu zpracování, představují klíčové otázky, které by měly být zodpovězeny nebo odpovědi na ně s co nejvyšší mírou přesnosti odhadnuty. Úlohu je možné řešit pro různé územní celky – celou ČR (L0), kraje (L1), obce s rozšířenou působností (L2), popř. pro základní územní jednotky (ZÚJ). Je dobré zmínit, že veškeré níže popsané metody a přístupy jsou aplikovány na data z Informačního systému odpadového hospodářství (ISOH).

Problematika modelování nakládání byla řešitelským týmem poprvé řešena ve studiích OPŽP v roce 2015 (ve spolupráci s EY, s.r.o). V dokumentu 1.1.1 Analýza stávající sítě v krajích a v ČR (EY, 2015a) bylo cílem určit potenciály různých hmotnostních toků odpadů pro konkrétní způsob nakládání na úrovni krajů a ORP. Znalost potenciálů představovala důležitý vstup pro následnou optimalizaci sítě v dokumentu 1.1.2 (EY, 2015b).

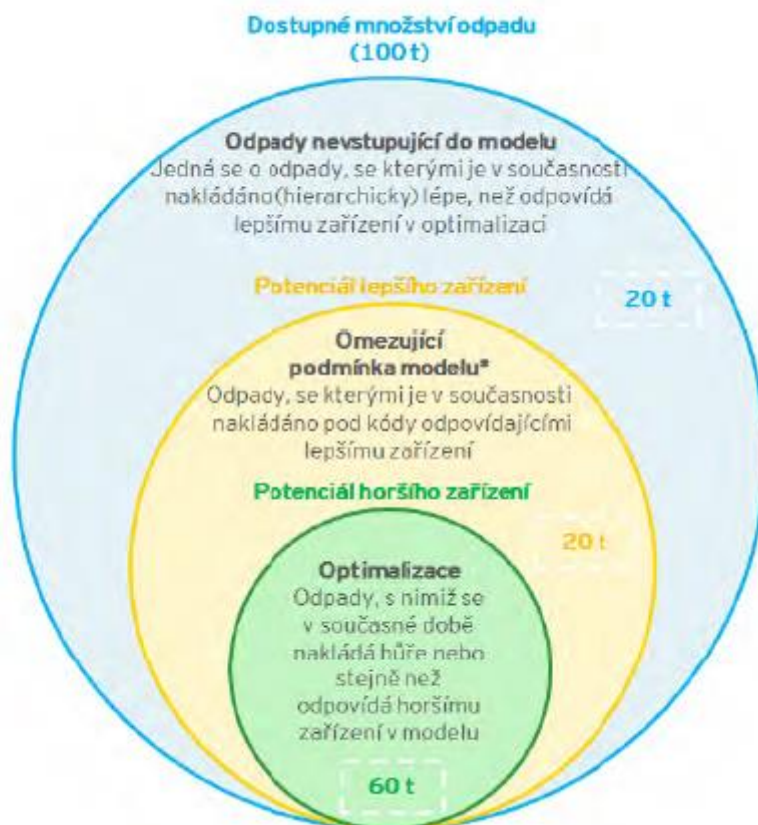
První takto detailní analýza dat o produkci a nakládání s odpady na nižších územních celcích ukázala:

- Množství vyprodukovaného odpadů (P) a zpracovaného odpadů (Z) v konkrétním územním celku obvykle není shodné. Bilance je ovlivněna transportem odpadů přes hranici územního celku. V případě bilance územního celku ČR se jedná o import a export, který je popsán kódy nakládání BN6 (Přeshraniční přeprava odpadu z členského státu EU do ČR), XN7 (Přeshraniční přeprava odpadu do členského státu EU z ČR), BN16 (Dovoz odpadu ze státu, který není členským státem EU) a XN17 (Vývoz odpadu do státu, který není členským státem EU). Písmeno X lze naradit písmeny A (vlastní odpad), B (převzatý odpad) a C (odpad z minulého roku).
- V případě nižších územních celků pak do transportu přes hranici územního celku řadíme také předání a převzetí z ostatních územních celků.
- Pokud dochází k transportu přes hranici územního celku, nelze vždy přesně určit podíly různých způsobů nakládání na produkci odpadů v daném územním celku.

- Je problematické popsat tok odpadů ve větším území. V důsledku spojování a následného rozpojování toků se ztrácí informace, kde vyprodukovaný odpad skončí a jak s ním bylo nakládáno.

Přístup zvolený ve studiích OPŽP 2015 pro hodnocení dostatečnosti sítě zpracovatelských zařízení je patrný na obr. 1. Ve zmíněné zprávě 1.1.2 (EY, 2015b) jsou v kap. 3 popsány detaily, které jsou pro lepší pochopení problému vysvětleny pomocí motivačních výpočtů pro modelový tok odpadu o hmotnosti 100 t.

Zjednodušeně lze říci, že přístup vycházel z předpokladu, že v případě posuzovaných odpadových toků celková produkce (vyjádřenou kódy způsobu nakládání A00, BN30, AN60) nevystihuje skutečné množství odpadů, která mohou být v posuzovaných zařízení zpracována. Optimalizace znamená ze své definice posun od neoptimálního uspořádání systému nakládání s odpady k optimální situaci, tj. posun k vyšším úrovním hierarchie v souladu se zákonem o odpadech a cíli Plánu odpadového hospodářství České republiky (POH ČR). Pokud byl tedy posuzován hmotnostní tok, který byl vhodný pro konkrétní zařízení, odečítalo se množství, které bylo zpracováno hierarchicky lepším způsobem, a současně se stanovila omezující podmínka, že musí dojít ke zlepšení situace.



Obr. 1: Přístup k definování potenciálů hmotnostních toků odpadů navržený ve studiích OPŽP v roce 2015 (EY, 2015b)

Proto bylo nutné si stanovit zjednodušující předpoklad, tj. zafixování územní struktury nakládaných odpadů (potenciálního hmotnostního toku) primárně podle územní struktury produkce. S tímto předpokladem bylo možné určit celkový objem produkce na úrovni ČR a také celkové množství spadající do potenciálu daného zařízení. Hmotnost odpovídající potenciálu byla následně vyjádřena v jednotkách produkce. Výsledný koeficient byl poté rovnoměrně aplikován na produkci v jednotlivých ORP.

Potenciál pro zpracování $Z(t) = \text{Produkce}(t) + \text{Dovoz}(t) - \text{Množství odpadu, s nímž je naloženo hierarchicky lepším způsobem}(t) - \text{Množství odpadu, které bylo vyvezeno mimo ČR}$.

Potenciální množství pro zpracování Z (dle modelového příkladu na obr. 1), tj. 60 tun vstupujících do optimalizace, bylo následně rozpočteno mezi jednotlivé ORP dle jejich současné produkce, tedy dle vzorce: Množství odpadu v ORP X pro optimalizaci = Dostupné množství odpadu (ORP X) * Potenciál (ČR) / Dostupné množství odpadu ČR. Výstup z této analýzy pak sloužil jako vstup pro analýzu existující zpracovatelské infrastruktury a návrhem pro její úpravu pomocí nástroje NERUDA (Šomplák et al., 2014).

Z uvedeného přístupu ze studie OPŽP 2015 je vidět, že bylo ke každému ORP přistupováno jako k průměrnému producentovi bez jakýchkoliv zahrnutí lokálního nakládání s odpady. Aby bylo možné lépe zohlednit aktuální stav v jednotlivých územních celcích ČR, je nutná sofistikovaná analýza produkce a nakládání s odpady.

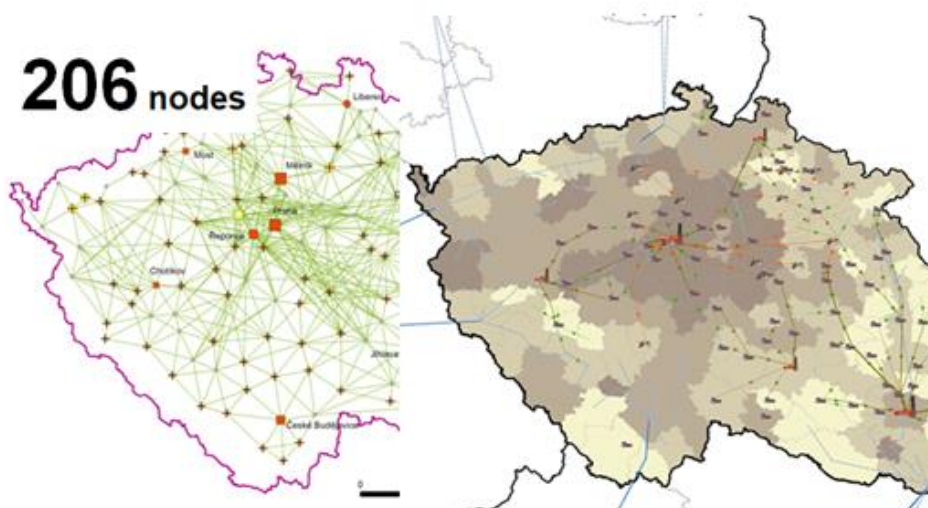
Z tohoto důvodu tým v roce 2016 zahájil práce na vývoji nástroje REVEDATO (Rekonstrukce a verifikace dat z ISOH – italský překlad: revidováno) pro rekonstrukci toku odpadů. Podrobnosti o nástroji REVEDATO jsou popsány v kap. 5.

Cílem výpočtu nástroje REVEDATO je v zásadě vytvořit datovou sadu, která bude pro konkrétní územní jednotku, kde byl odpad vyprodukován obsahovat informaci o toku odpadu v rámci ČR, místě případné úpravy a místě a způsobu finálního zpracování. Analogicky může být úloha řešena z pohledu územní jednotky, kde se nachází určitý typ zařízení. Cílem může být určit, odkud jsou do zařízení odpady dováženy a v rámci jakého řetězce předání probíhá celkový tok v rámci ČR. Výsledky lze tedy zobrazit ve formě map.

NERUDA je nástroj pro logistické dopravní úlohy, který je dlouhodobě vyvíjen na pracovišti řešitelů. Analyzované území je rozděleno do tzv. uzlů, které reprezentují produkci v daném územním celku. Základní úroveň detailu pro území ČR je obec s rozšířenou působností (ORP), kterých je v ČR 206. Součástí úlohy je model infrastruktury, který popisuje silniční a železniční síť mezi jednotlivými uzly. Jednotlivé hrany jsou v souladu s teorií grafů ohodnoceny maticí parametrů, které popisují specifické aspekty jednotlivých systémů (vzdálenost, zpoplatnění mýtem, druh komunikace, dopravní omezení apod). Nad touto sítí probíhá optimalizační výpočet, kdy jsou minimalizovány celkové náklady na dopravu a zpracování odpadů, popř. je úloha řešena jako vícekritériální optimalizace. Jako neznámé veličiny (a tedy výstupy) jsou kapacity zařízení v jednotlivých lokalitách a toky po jednotlivých hranách.

Výsledek výpočtu pro konkrétní úlohu je pak viditelný na obr. 2 v pravé polovině. Obrázek ukazuje doporučené rozmístění zařízení EVO, jejich optimální kapacitu (čím větší symbol,

tím větší kapacita), svozové trasy do jednotlivých zařízení, použitý systém dopravy (silniční, železniční – v obrázku odlišeno barvou) a umístění překladišť odpadů.



Obr. 2: Infrastrukturní model a příklad vizualizace výsledků výpočtu pomocí nástroje NERUDA

První koncept byl navržen v bakalářské práci (Procházka, 2012). Ihned po dokončení práce následovala první aplikace nástroje v rámci studie pro Skupinu ČEZ, a.s. Úkolem byl prvotní screening vhodných lokalit pro výstavbu zařízení EVO. Zpětná vazba z reálné zakázky a diskuse s potenciálními investory vedla ke kontinuálnímu rozvoji nástroje, který je detailně popsán v dizertační práci (Šomplák et al., 2016).

Na národní úrovni byl nástroj NERUDA využit při řešení projektu (Efekt 2013), kde se již plně ukázaly jeho přednosti, založené vesměs na systematickém kontinuálním vývoji tohoto nástroje. Dále byl NERUDA použit při řešení studií v oblasti návrhu systému zpracování zbytkových materiálů nevyužitelných odpadů na nižších územních celcích, konkrétně dvakrát na krajské úrovni (2015) a dvakrát na mikroregionální úrovni (2015 a 2016). V roce 2015 pak byla na nástroji NERUDA postavena metodika řešení rozsáhlého projektu (EY, 2015). Úkolem týmu řešitelů bylo provést návrh optimální sítě nakládání s odpady pro celou řadu skupin odpadů zahrnujících jak komunální, tak průmyslové odpady.

Různé aplikace a modifikace nástroje NERUDA byly publikovány v impaktovaných časopisech. Práce Šomplák et al., (2014) sumarizovala princip nástroje NERUDA a jeho funkčnost byla demonstrována na případové studii.

Společným znakem všech dosavadních aplikací nástroje NERUDA je, že modelují určitý budoucí stav (scénář). Zcela legitimní otázka pak je, jaké je srovnání navrženého budoucího scénáře se současným stavem, např. z pohledu dopravních vzdáleností, emisí, popř. dalších parametrů relevantní pro menší územní celky. Na tuto otázku dosud nebylo možné efektivně odpovědět, protože neexistoval způsob, jak určit a modelovat současný tok odpadů v modelovém území.

Cílem této zprávy je představit princip, shrnout dosavadní práce a ukázat možnosti využití nástroje REVEDATO pro analýzu současného stavu produkce a nakládání s odpady. Uvedené informace mají současně za cíl iniciovat diskusi o konkrétních tocích a úlohách, na kterých by byl nástroj REVEDATO v rámci projektu CEVOOH používán.

2 Historie a současný stav vývoje

V roce 2016 řešitelský tým začal vyvíjet přístup pro zpracování a analýzu dat z ISOH s cílem určit toky odpadu mezi subjekty působícími v odpadovém hospodářství. Bylo navrženo a testováno více přístupů, které se implementovaly do matematických modelů. Některé z nich byly dokonce publikovány v odborných časopisech. Příkladem může být model, který bral do úvahy hierarchii nakládání s odpady a vzdálenost přepravy odpadu (Šomplák et al., 2017a). Další přístup byl založen na posuzování shody informace o množství u předání a převzetí odpadu (Šomplák et al., 2017b).

Výsledky těchto prvních pokusů dávaly řešitelskému týmu naději, že má ve vývoji smysl pokračovat. Proto byl dále vývoj začleněn do projektu (SPETEP DMS), který byl řešen na pracovišti řešitelského týmu. Kombinace metod, popsanych ve dříve zmíněných publikacích, byla vyzkoušena na objemném odpadu. S ohledem na obrovské množství kombinací toků odpadu bylo možné vyřešit úlohu pouze na krajské úrovni, tj. pro 14 uzlů (Šomplák et al., 2019). Pomocí určitých vylepšení, především v pre-processingu dat, se podařilo napočítat toky pro odpadové kaly (kat. č. 190805) i pro územní členění na ORP (Václavková et al., 2020).

Další vývoj rekonstrukce dat z ISOH se je součástí projektu CEVOOH, pracovního balíků 1F, kde je cílem překonat výpočtové komplikace a analyzovat data na úrovni ZÚJ (popřípadě konkrétních subjektů). Nástroj dále podporuje práce ve WP 1B, kde

předmětem zájmu jsou kaly z čištění odpadních vod. S ohledem na vlastnosti jednotlivých kroků (rekonstrukce, validace aj.) byl pro nástroj navržen název REVEDATO, což v italštině znamená revidováno.

3 Požadavky na data

Jak bylo zmíněno výše, všechny zde popsané analýzy jsou opřeny o data z ISOH. Aby bylo možné data analyzovat, musí každý záznam obsahovat určité informace. Konkrétně se jedná o:

- evident a partner,
- kód nakládání,
- Množství odpadu + a - [t].

Doprovodnými informacemi je rok, katalogové číslo. Je nutné poznamenat, že přesnost rekonstrukce dat je přímo úměrná detailu vstupních dat. Tzn., že je vhodné pracovat s daty ZÚJ, případně s přímo s evidencí od jednotlivých subjektů, zde ale může být již komplikace s výpočetními nároky. Zvládnout tuto oblast je jednou ze základních výzev projektu CEVOOH.

4 Legislativní zakotvení

Nový zákon o odpadech (Zákon č. 541/2020 Sb.) přinesl mnoho změn nejen z pohledu cílů pro navýšení recyklace, ale i v oblasti vykazování dat. Data jsou sbírány prostřednictvím každoročního hlášení o produkci a nakládání s odpady. Nově byly doplněny kódy nakládání pro sekundární vznik odpadu BN41 a BN44. Další důležitou změnou je i povinnost uvádět množství a finální nakládání pro případ předúpravy odpadu. Tyto změny se do dat, která byla používána pro vývoj nástroje REVEDATO dosud nepromítly. I přes neustálé zlepšování parametrů evidence dat o produkci a nakládání s odpady zakotvených v legislativě České republiky není možné některé informace, nezbytné pro provedení rekonstrukce toku, jednoduše v datech dohledat.

V případě předání odpadu (např. vykázáno kódy nakládání XN3) dochází často k agregaci odpadu od více producentů a u následného nakládání již není možné s jistotou určit původce odpadu. Proto neexistují kompletní informace o tom, kde a jak se nakládalo s odpadem od konkrétního producenta. Tato informace je dostupná pouze v agregované formě za Českou republiku, ale na regionální nebo municipální úrovni tato data nejsou v

současnosti dostupná. Tak, jak je vykazování dat nastaveno, není možné tyto informace ve větším územním detailu získat (dopočítat). Nicméně díky tomu, že je roční hlášení již velmi detailní, je možné některé toky (producent-zpracovatel) odpadu určit jistě, některé s velkou pravděpodobností a na základě splnění mnoha nutných omezení (hmotností bilance apod.) je odhadnutelný i zbytek dat. Z tohoto důvodu dává smysl se věnovat rekonstrukci toků z dat ISOH a mít tak poměrně kvalitní odhad i pro úroveň regionů a municipalit. Přístup rekonstrukce dat pomocí nástroje REVEDATO navíc dává i informaci s jakou mírou přesnosti bylo u jednotlivých výsledků (toky producent-zpracovatel) dosaženo. Například když odpad je předán do jiné ZÚJ a tam se provede pouze jeden způsob nakládání bez další předávky, je informace "producent-zpracovatel-způsob nakládání" jistá.

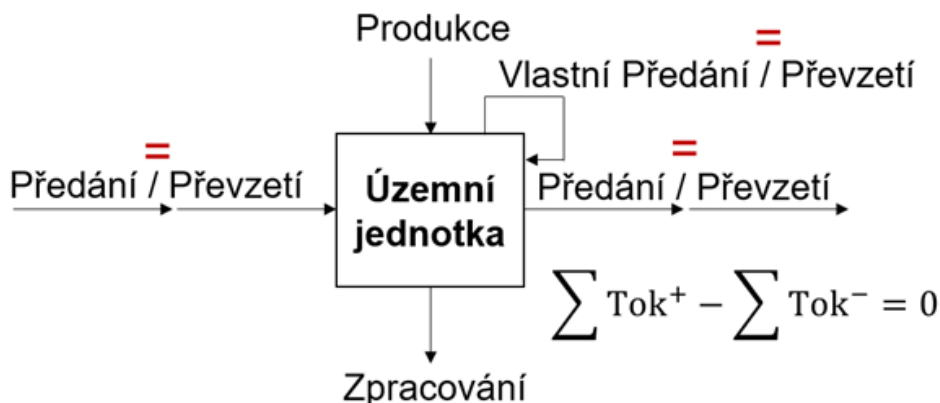
Kdyby byly systémy vhodně nastaveny pro sběr dat kontinuálně, omezila by se agregace dat a tím i velmi radikálně zvýšila jistota výsledků rekonstrukce toků odpadu. Nicméně každá doplněná informace do ročního hlášení o produkci a nakládání s odpady má pozitivní dopady na vytěžení informací z datové sady pro potřeby modelování.

5 Princip nástroje REVEDATO

Nutným předpokladem pro možnost analyzování toků odpadu je zajištění splnění dvou podmínek:

- 1) bilance v uzlu, tj. $\text{Produkce} + \text{převzetí odpadu} = \text{zpracování} + \text{předání odpadu}$
- 2) množství předaného odpadu subjektem A subjektu B = množství převzatého odpadu subjektem B od subjektu A.

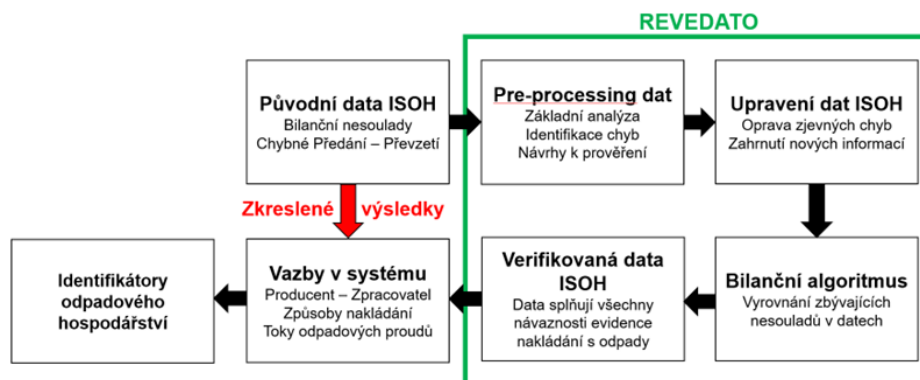
Obě podmínky jsou schématicky zobrazeny na obr. 3.

Bilance uzlu – všechny toky spojené s uzemní jednotkou


Obr. 3: Základní bilance v nástroji REVEDATO

I za předpokladu ideálního stavu, kdy jsou bilance splněny, není dostupná kompletní informace pro rekonstrukci. V důsledku spojování (agregace) a rozpojování bilancovaných toků v uzlech se informace o původci odpadu ztrácí. To znemožňuje mít informace o způsobu nakládání s odpady pro jednotlivé producenty (producent-zpracovatel). Chybějící informace je ale možné odhadovat pomocí bilančních výpočtů.

Na základě předběžné analýz pro konkrétní typy odpadových proudů (viz níže) bylo zjištěno, že bilance (viz obr. 3) nejsou často splněny a je jasné, že se v datech vyskytují chyby. Pro jejich identifikaci se postupuje ve dvou krocích, viz obr. 4. Prozatím nástroj REVEDATO obsahuje pouze čtyři funkce zobrazené na obr. 4 (bloky v zeleném rámečku). V rámci dalšího vývoje bude začleněna i blok "Vazby v systému", kde se již bude rekonstrukce dat rozšířená i o informace, kde a jak jednotliví producenti nakládali se svými odpady.



Obr. 4: Popis nástroje REVEDATO

V prvním kroku projdou data tzv. pre-processingem (viz obr. 4). V rámci pre-processingu se vyhledávají chybné evidence s určitými vlastnosti. Jedná se o nesplnění podmínky 2 (množství odpadu u předání vs. převzetí, viz výše), stejný subjekt a stejné množství odpadu u dvou a více evidentů. Příklad je uveden na obr. 5, kde ZÚJ Kunovice předávají do ZÚJ Kunovice (vlastní předání) ovšem bez následného vykázání převzetí. Zároveň vykazují převzetí ZÚJ Uherské Hradiště od ZÚJ Kunovice a to stejné množství odpadu. Nástroj REVIDATO v rámci pre-processingu dat identifikuje tyto chyby a opraví partnery transakce tak, aby byly splněny všechny požadavky popsány v této kapitole.

Rok	Evident - název ZÚJ	Evident - název kraje	Partner - název ZÚJ	Partner - název kraje	Kód nakládání	Množství odpadu + (t)	Množství odpadu - (t)
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Kunovice	Zlínský kraj	A00	3 186.140	
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Kunovice	Zlínský kraj	BN3		1 735.040
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Kunovice	Zlínský kraj	C00	382.480	
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Kunovice	Zlínský kraj	CN3		382.480
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Brumov-Bylnice	Zlínský kraj	B00	823.600	
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Luhačovice	Zlínský kraj	B00	925.300	
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Valašské Klobouky	Zlínský kraj	B00	237.200	
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Koryčany	Zlínský kraj	BN3		449.220
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Buchlovice	Zlínský kraj	AN3		3 186.140
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Buchlovice	Zlínský kraj	BN3		1 466.300
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Uherský Brod	Zlínský kraj	B00	1 664.460	
Rok	Evident - název ZÚJ	Evident - název kraje	Partner - název ZÚJ	Partner - název kraje	Kód nakládání	Množství odpadu + (t)	Množství odpadu - (t)
2020	Uherské Hradiště	Zlínský kraj	Kunovice	Zlínský kraj	B00	1 735.040	
2020	Uherské Hradiště	Zlínský kraj	Uherské Hradiště	Zlínský kraj	BN13		1 846.940
2020	Uherské Hradiště	Zlínský kraj	Prakšice	Zlínský kraj	B00	48.750	
2020	Uherské Hradiště	Zlínský kraj	Strání	Zlínský kraj	B00	63.150	



Rok	Evident - název ZÚJ	Evident - název kraje	Partner - název ZÚJ	Partner - název kraje	Kód nakládání	Množství odpadu + (t)	Množství odpadu - (t)
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Kunovice	Zlínský kraj	A00	3 186.140	
2020	Kunovice	Zlínský kraj	Uherské Hradiště	Zlínský kraj	BN3		1 735.040

obr. 5: Ukázka opravy zjevné chyby v datech ISOH, kat. č. 190805

V druhém kroku je provedena bilanční (optimalizační) úloha schematicky popsána na obr. 3 na data po pre-processingu, viz obr. 4. Do nástroje jsou vhodně implementovány váhy pro upřednostnění určitých informací. Např. Více důvěry vzbuzují data, kdy množství odpadu jedné transakce je podobné u subjektu, který vykazuje předání, jak u subjektu, který vykazuje převzetí. Dále se předpokládá transport odpadu spíše na kratší než na delší vzdálenosti a podobně. Je nutné podotknout, že čím více dat je ověřeno (splňuje všechny podmínky) před bilančním výpočtem, tím kvalitnější se dá rekonstrukce dat očekávat.

V následující části bude představen matematický model pro bilanční výpočet. Nejprve je uveden výčet použitých symbolů.

Množiny

$i, j \in I$

Množina všech ZÚJ

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

Parametry

$F_{i,j}^+$	Evidované převzetí odpadu v ZÚJ i od ZÚJ j
$F_{i,j}^-$	Evidované předání odpadu v ZÚJ i do ZÚJ j
M	Konstanta charakterizující nekonečno (dostatečně velké číslo)
P_i	Evidovaná produkce odpadu v ZÚJ i
T_i	Evidované zpracování odpadu v ZÚJ i
$w_{i,j}^{F+}$	Váha převzetí odpadu v ZÚJ i od ZÚJ j
$w_{i,j}^{F-}$	Váha předání odpadu v ZÚJ i do ZÚJ j
w_i^P	Váha produkce odpadu v ZÚJ i
w_i^T	Váha zpracování odpadu v ZÚJ i

Proměnné

$\alpha_{i,j}^+, \alpha_{i,j}^-$	Rozdělení nesouladu na předání – převzetí mezi ZÚJ i a ZÚJ j
$\gamma_{i,j}^{F+}$	Vnesená chyba na převzetí odpadu v ZÚJ i od ZÚJ j
$\gamma_{i,j}^{F+}, \gamma_{i,j}^{F-}$	Rozdělení chyby na kladnou a zápornou část (převzetí)
$\gamma_{i,j}^{F-}$	Vnesená chyba na předání odpadu v ZÚJ i do ZÚJ j
$\gamma_{i,j}^{F+}, \gamma_{i,j}^{F-}$	Rozdělení chyby na kladnou a zápornou část (předání)
γ_i^P	Vnesená chyba na produkci odpadu v ZÚJ i
$\gamma_i^{P+}, \gamma_i^{P-}$	Rozdělení chyby na kladnou a zápornou část (produkce)
γ_i^T	Vnesená chyba na zpracování odpadu v ZÚJ i
$\gamma_i^{T+}, \gamma_i^{T-}$	Rozdělení chyby na kladnou a zápornou část (zpracování)

Účelová funkce optimalizačního modelu je rovna součtu všech vnesených odchylek do dat, které jsou nutné pro zajištění hmotnostních bilancí a vazeb v systému. Tyto odchylky musí být z důvodu správné implementace rozděleny na kladnou a zápornou část (viz. níže popis rovnic (5) a (6)). Každý element systému má přiřazenou míru věrohodnosti, která je v modelu implementovaná za pomoci vah. Cílem je vnést do evidence minimální množství chyb, tato suma odchylek je tak minimalizována. Příslušný matematický zápis je uveden v rovnici (1), kde jsou postupně zohledněny korekce převzetí, předání, produkce a zpracování. Poslední člen účelové funkce reprezentuje pomocný vztah, který díky parametru M umožní získat při rozdělení nesouladu na předání – převzetí nejmenší možné hodnoty (viz. popis rovnic (11-13)).

$$\min \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} w_{i,j}^{F_+} (\gamma_{i,j}^{F_+} + \gamma_{i,j}^{F_-}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} w_{i,j}^{F_-} (\gamma_{i,j}^{F_+} + \gamma_{i,j}^{F_-}) + \sum_{i \in I} w_i^P (\gamma_i^{P_+} + \gamma_i^{P_-}) \right. \\ \left. + \sum_{i \in I} w_i^T (\gamma_i^{T_+} + \gamma_i^{T_-}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} M(\alpha_{i,j}^+ + \alpha_{i,j}^-) \right). \quad (1)$$

Následující matematické formulace vyjadřují omezení pro optimalizační model. Jedná se zejména o zajištění hmotnostních vazeb na všech úrovních bilancovaného systému. Následující rovnice (2) popisuje rovnost mezi předáním a převzetím. Evidovaná hodnota převzetí včetně odhadnuté chyby musí být rovna evidované hodnotě předání s odhadnutou chybou.

$$F_{i,j}^+ + \gamma_{i,j}^{F_+} = F_{j,i}^- + \gamma_{j,i}^{F_-}, \quad \forall i \in I, j \in I. \quad (2)$$

Další rovnice (3) zajišťuje hmotnostní bilanci dle obr. 3 v rámci jednoho ZÚJ. Součet evidence produkce s příslušnou odchylkou a převzatým odpadem musí být roven součtu zpracování s odchylkou a předaným odpadem.

$$P_i + \gamma_i^P + \sum_{j \in I} (F_{i,j}^+ + \gamma_{i,j}^{F_+}) = T_i + \gamma_i^T + \sum_{j \in I} (F_{j,i}^- + \gamma_{j,i}^{F_-}), \quad \forall i \in I. \quad (3)$$

Rovnice (4) zajišťuje hmotnostní bilanci v rámci celého bilancovaného systému. Všech vyprodukovaný odpad musí být zpracován. Součet korigovaných produkcí tak musí odpovídat součtu korigovaných zpracování.

$$\sum_{i \in I} (P_i + \gamma_i^P) = \sum_{i \in I} (T_i + \gamma_i^T). \quad (4)$$

Jelikož odchylka může nabývat libovolné hodnoty, v rámci minimalizace by tak záporné odchylky snižovaly hodnotu účelové funkce. Pro správnou implementaci odchylek je tedy nutné uvažovat jejich absolutní hodnotu, která však z pohledu optimalizace narušuje příznivé podmínky pro hledání optimálního výsledku. Tato problematika lze vyřešit rozdělením odchylek na kladnou a zápornou část, jak popisují rovnice (5) a (6). Zároveň je nutné zajistit, aby tyto proměnné byly nezáporné. Tato podmínka je popsána rovnicí (7).

$$\gamma_{i,j}^{F_+} = \gamma_{i,j}^{F_+^+} - \gamma_{i,j}^{F_+^-}, \quad \gamma_{i,j}^{F_-} = \gamma_{i,j}^{F_-^+} - \gamma_{i,j}^{F_-^-}, \quad \forall i \in I, j \in I, \quad (5)$$

$$\gamma_i^P = \gamma_i^{P_+} - \gamma_i^{P_-}, \quad \gamma_i^T = \gamma_i^{T_+} - \gamma_i^{T_-}, \quad \forall i \in I, \quad (6)$$

$$\gamma_{i,j}^{F^+}, \gamma_{i,j}^{F^-}, \gamma_{i,j}^{P^+}, \gamma_{i,j}^{P^-}, \gamma_i^{T^+}, \gamma_i^{T^-} \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in I. \quad (7)$$

Aby byla zachována smysluplnost řešené úlohy, nesmí nastat situace, kdy odchylka způsobí záporný tok, produkci či zpracování odpadu. Z toho důvodu jsou definovány rovnice (8–10)

$$F_{i,j}^+ + \gamma_{i,j}^{F^+} \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in I, \quad (8)$$

$$P_i + \gamma_i^P \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad (9)$$

$$T_i + \gamma_i^T \geq 0, \quad \forall i \in I. \quad (10)$$

Jako další podmínku bilančního výpočtu je vhodné implementovat omezení, které zajistí, že předání a převzetí odpadu se nebude bilancovat přes hranice evidovaných hodnot. Ve skutečnosti toto omezení zajistí zafixování zejména těch případů, kdy evidence na obou stranách vykazovaného toku hodnotově odpovídají. Tyto toky lze považovat za správné a není tak žádoucí do nich jakkoliv zasahovat. Pro implementaci toho omezení do modelu byl využit princip rozdělení nesouladu na předání – převzetí na kladnou a zápornou část (viz. rovnice (11)). Proměnné $\alpha_{i,j}^+$ a $\alpha_{i,j}^-$ musí být nejmenší možná čísla pro splnění definované rovnosti. Proto byly tyto hodnoty zohledněny v účelové funkci a váženy dostatečně velkou hodnotou. Tento nesoulad pak musí být roven odchylkám vneseným na tento tok, aby byla splněna rovnost mezi předáním a převzetím (rovnice (12)). Pro správnou funkčnost je ještě zapotřebí zajistit nezápornost proměnných využívaných pro rozdělení nesouladu (rovnice (13)).

$$F_{i,j}^+ - F_{j,i}^- = \alpha_{i,j}^+ - \alpha_{i,j}^-, \quad \forall i \in I, j \in I, \quad (11)$$

$$\alpha_{i,j}^+ + \alpha_{i,j}^- = \gamma_{i,j}^{F^+} + \gamma_{i,j}^{F^-} + \gamma_{j,i}^{F^+} + \gamma_{j,i}^{F^-}, \quad \forall i \in I, j \in I, \quad (12)$$

$$\alpha_{i,j}^+, \alpha_{i,j}^- \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in I. \quad (13)$$

Aby se ověřil bilanční model, byla aplikován na data bez pre-processingu a byly analyzovány výsledky po samotném pre-processingu a po bilančním modelu. Až na malé odchylky, viz drobný zůstatek u Prahy 10 na obr. 6, byla většina chyb identifikována totožně. Tím se ověřila správnost bilančního modelu a zároveň i přidaná hodnota pre-processingu.

Původní evidence

Rok	Evident - název ZÚJ	Evident - název kraje	Partner - název ZÚJ	Partner - název kraje	Kód nakládání	Množství odpadu + (t)	Množství odpadu - (t)
2020	Světiče	Středočeský k	Praha 10	Hlavní město P	B00	4 405.900	
2020	Světiče	Středočeský k	Benešov	Středočeský k	B00	610.000	
2020	Světiče	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	BR10		5 341.900
2020	Světiče	Středočeský k	Úvaly	Středočeský k	B00	326.000	
Rok	Evident - název ZÚJ	Evident - název kraje	Partner - název ZÚJ	Partner - název kraje	Kód nakládání	Množství odpadu + (t)	Množství odpadu - (t)
2020	Benešov	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	BN3		610.000
2020	Říčany	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	AN2		2 884.900
2020	Světiče	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	BR10		5 341.900
2020	Úvaly	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	AN3		326.000
2020	Jesenice	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	AN2		1 333.200
2020	Zlatníky-Hodkovice	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	AN2		61.600
2020	Nupaky	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	AN2		126.200



Evidence po bilančním algoritmu (bez pre-processingu)

Rok	Evident - název ZÚJ	Evident - název kraje	Partner - název ZÚJ	Partner - název kraje	Kód nakládání	Množství odpadu + (t)	Množství odpadu - (t)
2020	Světiče	Středočeský k	Praha 10	Hlavní město P	B00	17.400	
2020	Světiče	Středočeský k	Říčany	Středočeský k	B00	2 867.500	
2020	Světiče	Středočeský k	Jesenice	Středočeský k	B00	1 333.200	
2020	Světiče	Středočeský k	Zlatníky-Hodkovice	Středočeský k	B00	61.600	
2020	Světiče	Středočeský k	Nupaky	Středočeský k	B00	126.200	
2020	Světiče	Středočeský k	Benešov	Středočeský k	B00	610.000	
2020	Světiče	Středočeský k	Světiče	Středočeský k	BR10		5 341.900
2020	Světiče	Středočeský k	Úvaly	Středočeský k	B00	326.000	

obr. 6: Ukázka výsledku bilančního modelu bez pre-processingu

6 Navrhované typy úloh

Hlavním výstupem nástroje REVEDATO je rekonstrukce a verifikace dat z ISOH, tj. oprava základních bilancí a nesouladu u výkazu mezi evidenty a partnery. Nástavbou a plánem dalšího vývoje je i rekonstrukce informací s ohledem na zjištění kde a jakým způsobem nakládali konkrétní evidenti (producenti) odpadu. Tato informace se z důvodu agregace toku a jejich následného roztékání ztrácí. Zároveň není známo konkrétní nakládání v případě, že evident vykazuje více způsobu nakládání a zároveň přebírá od více partnerů odpad. Tvůrci nástroje REVEDATO jsou přesvědčení, že velká část neznámých informací půjde z dat s velikou pravděpodobností určit obdobnými technikami, které byly popsány

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

v kap. 5. Vývoj nástroje bude v rámci tohoto projektu dále pokračovat a předpokládá se přispění při řešení následujících úloh:

- Plnění identifikátorů (způsob nakládání s odpady) v různém detailu územního členění (kraje, ORP, ZÚJ). Bude možné sledovat nakládání ve větším detailu, než je stát.
- Potenciál pro změnu nakládání s odpady – plnění hierarchie nakládání s odpady, cílů v CEP (Circular Economy Package) aj. Bude možné identifikovat území (regiony), kde je velký potenciál pro změnu nakládání, např. navýšení materiálového využití odpadu.
- Datová sada pro poskytnutí spravedlivé motivační (popř. penalizační) podpory v oblasti nakládání s odpady.
- Monitoring odpadového hospodářství – pomocné nástroje pro vyplnění ročních hlášení o produkci a nakládání s odpady na různých úrovních (evident, ORP, Kraj, ČR). Upozornění na chybně vyplněné hlášení, možnost požit i jako podpůrný nástroj v návodu, jak hlášení vyplnit.

7 Příklady aplikace

Nástroj REVEDATO je vyvíjen s pomocí dat konkrétních dat z ISOH. V návaznosti na ostatní pracovní balíčky tohoto projektu byly vybrány jako modelované a testovací tok kaly z čištění komunálních odpadních vod a textilní odpad.

Při rekonstrukci toku je prvním krokem zjištění bilancí jak v jednotlivých ZÚJ, tak i v systému jako celku (viz kap. 5. V principu je pracováno se čtyřmi typy nakládání: produkce, zpracování, transport – převzetí a transport – předání. K nim přísluší následující vykazované kódy, kde úvodní symbol charakterizuje, k jakému zdroji odpadu přísluší.

Produkce:

- A00 – Produkce odpadu (vlastní vyprodukovaný odpad)
- BN6 – Přeshraniční přeprava odpadu z členského státu EU do ČR
- BN16 – Dovoz odpadu ze státu, který není členským státem EU
- BN30 – Převzetí zpětně odebraných některých výrobků
- BN40 – Odpad po úpravě, když nedošlo ke změně katalogového čísla odpadu
- C00 – Množství odpadu převedené z minulého roku (zůstatek na skladu k 1. lednu vykazovaného roku)

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

- XN50 – Inventurní rozdíl – vyrovnání nedostatku odpadu
- XN60 – Staré zátěže, živelní pohromy, černé skládky apod.

Transport – převzetí:

- B00 – Odpad převzatý od původce, jiné oprávněné osoby (sběr, výkup, shromažďování), nebo jiné provozovny

Transport – předání: XN2, XN3, XN10

- XN2 – Předání kalů ČOV k použití na zemědělské půdě
- XN3 – Předání jiné oprávněné osobě (kromě přepravce, dopravce), nebo jiné provozovně
- XN10 – Prodej odpadu jako suroviny („druhotné suroviny“)

Zpracování: Ostatní

Kód BN30 zpětného odběru má uvedeného partnera v evidenci. Pro transport je však charakteristické tvoření párových transakcí předání – převzetí, které v případě tohoto kódu není realizováno a tento kód nakládání je tak považován za produkci. Přeshraniční transport je pak uvažován jako produkce nebo zpracování, jelikož opět neexistuje transakce do páru.

7.1 Kaly z čištění komunálních odpadních vod (WP 1.B.4)

Agregovaných data za Českou republiku pro produkci a nakládání s kaly:

Celková produkce = 954 170 t (součet množství všech transakcí s kódy nakládání definovanými jako produkce, viz text výše)

Celkové zpracování = 971 128 t (součet množství všech transakcí s kódy nakládání definovanými jako zpracování, viz text výše)

Rozdíl = 16 958 t

Z těchto hodnot je patrné, že v systému evidence dochází k chybám, které mají za následek rozdíl téměř 17 kt (necelá 2 %).

Při analýze dílčích ZÚJ bylo zjištěno, že bilance ve všech ZÚJ je rovna nule (tj. Produkce – Zpracování + Transport převzetí – Transport předání). Jde o různé chyby v systému napříč nakládáním, ale jelikož výše zmíněná bilance v jednotlivých uzlech je splněna, lze

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

považovat za jednu z možných chyb nesoulad v transportu mezi předáním a převzetím. Tato chyba se však promítá i do samotné produkce a zpracování odpadních kalů. Dalším krokem při rekonstrukci toků je tedy podrobná analýza předání – převzetí.

Z analýzy transportu odpadních kalů vyplývá, že lze definovat čtyři typy transakcí. První z nich je, kCambir Stehlík, CSc., dr. h. c.

Václavková Š., Pluskal J., Šomplák R., Talpa J., Smejkalová V., 2020. Resolving discrepancies in reported flow amounts in sewage sludge management network datasets by mathematical programming. *Chemical Engineering Transactions*, 81, 745-750. DOI:10.3303/CET2081125.

Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech a související předpisy.

Příloha 1

Metodika stanovení potenciálu v dokumentu 1.1.2 Projektu Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014 – 2020, **kapitola 3**.

EY, 2015a. Návrh optimální sítě zařízení k nakládání s odpady v rámci celé ČR včetně stanovení potřebných kapacit těchto zařízení ve všech krajích. 1.1.1 Analýza stávající sítě v krajích a v ČR. Výstup projektu