

Prognóza produkce bioodpadu

Veronika Smejkalová, Radovan Šomplák, Vlastimír Nevrlý, Jaroslav Pluskal,

Josef Jadrný, Tomáš Lipovský

*Ústav procesního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
Veronika.Smejkalova1@vutbr.cz*

Souhrn

V posledních letech dochází k významnému nárůstu produkce bioodpadu vlivem změny legislativy. Představená prognóza produkce této frakce odpadu zohledňuje změnu trendu v historických datech. Přístup vychází z myšlenky teorie kredibility, kdy predikovaná hodnota kombinuje individuální a kolektivní informaci jednotlivých producentů odpadu. Touto cestou je možné prognózovat produkci bioodpadu také u producentů, u kterých se nárůst separace doposud neprojevil v historických datech.

Klíčová slova: *produkce odpadu, bioodpad, prognóza, kredibilní modely*

Úvod

V důsledku demografických změn, technologického vývoje a měnícího se životního stylu, současná společnost čelí stále rostoucí produkci odpadu [1]. Tento fakt vyžaduje nezbytný zásah do stávajícího nastavení odpadového hospodářství (OH). Úroveň OH se zásadně liší v jednotlivých státech, rozhodující je zejména ekonomická síla dané země [2]. Je tedy nezbytné modernizovat systém OH, který bude ekonomicky, ekologicky i sociálně dlouhodobě udržitelný.

Systém OH zahrnuje kompletní nakládání s odpady: jeho sběr, dopravu, případnou úpravu a finální zpracování. Ve vyspělých zemích je v současné době podporován přechod od klasického lineárního hospodářství k hospodářství oběhovému [3]. V rámci EU jsou preferované způsoby nakládání s odpady specifikovány Hierarchií nakládání s odpady [4]. Tento dokument stanovuje způsoby nakládání s odpady dle priority následovně:

1. předcházení vzniku odpadů,
2. opětovné použití,
3. materiálové využití,
4. jiné využití odpadů (např. energetické),
5. skládkování.

Cílem je šetřit omezené primární zdroje a životní prostředí [5]. Pro vytvoření udržitelného systému OH je nutné vycházet z potřebných plánů. Vstupním zdrojem dat pro plánování OH se často stává očekávaný budoucí vývoj produkce odpadu. Očekávaný vývoj produkce odpadů založený na současných podmínkách byl impulsem pro vytvoření nových pravidel v rámci Balíčku oběhového hospodářství. Cílem je plynulá změna v nakládání s odpady a podpora uplatňování Hierarchie nakládání s odpady. Pro komunální odpad (KO) jsou zásadní následující směrnice:

- Směrnice (EU) 2018/850 [6] stanovuje maximální míru skládkování KO na 10 % do roku 2035.
- Směrnice (EU) 2018/851 [7] stanovuje minimální míru recyklace nebo opětovného využití KO od 2025 na 55 % a nárůst dalších 5 % každých 5 let do roku 2035.

K dosažení těchto cílů je nutné reagovat včas a vybudovat potřebnou infrastrukturu. Aby bylo možné navrhnout dosažitelné plány OH, musí být použity vysoce kvalitní prognostické nástroje zohledňující potřebný časový horizont a předmětné frakce odpadu.

Modelování produkce odpadu

Modelování produkce odpadu je v současné době velmi diskutovaným tématem, o čemž svědčí stále rostoucí počet publikací na toto téma. Přístupy pro modelování produkce odpadu byly sumarizovány v rešerších: Beigl et al., 2008 [8] – 45 publikací a Goel et al., 2017 [9] – 100 publikací.

Stávající přístupy využívaly různé metody, které lze rozdělit do dvou základních směrů – modely vazeb v datech a analýza časových řad.

- a) **Modelování vazeb v datech** využívá jak klasické metody, tak metody strojového učení. OH je komplexní oblast, která odráží mnoho faktorů a chování společnosti. Na produkci odpadu má vliv řada socio-ekonomických, demografických, environmentálních a dalších faktorů. Pro kvalitu lineárních regresních modelů je rozhodující úroveň územního členění (stát, kraj, obec s rozšířenou působností – ORP, obec). Důvodem je, že agregovaná data jsou v některých případech schopna potlačit variabilitu vzniklou na úrovni obcí. Tuto skutečnost dokazují případové studie z České republiky. Lineární regresní model představený v příspěvku [10] na úrovni obcí uvažoval 12 faktorů pro modelování produkce KO v českých obcích. Osm charakteristik bylo identifikováno jako významné, byly však schopny vysvětlit pouze 5,1% variability produkce odpadu. Ve srovnání s výsledky [11], kde bylo možné vytvořit model pro regionální úroveň s $R^2 = 0,86$. Vyšší přesnost ve srovnání s výsledkem práce [10] je pravděpodobně způsobena vyššími územními detaily (regiony). Tento přístup založený na lineární regresi je však pro prognózování nevhodný, pokud není možné kvalitně předpovídat významné faktory.
- b) **Analýza časových řad** modeluje vývoj sledované proměnné v čase. Modely časových řad pro predikci produkce KO byly porovnány po konkrétní město ve studii [12]. Dlouhých časových řad nelze dosáhnout u dat v ročním detailu, takže obvykle analýza časových řad pracuje s měsíčními údaji. U ročních údajů lze pozorovat pouze trendovou složku, kterou se v těchto případech daří modelovat relativně úspěšně [13]. Příspěvek [13] představil model trendu na základě 16 historických pozorování. Trendová funkce v podobě S-křivky byla vyhodnocena jako nejvhodnější model pro predikci KO. Modelování trendu ve tvaru S-křivky je typické pro šíření systémových změn, kdy časové řady začínají pozvolným růstem. Modely trendu v datech čelí několika překážkám, jako jsou: krátké časové řady, nízká kvalita dat, nelinearita – možné nalezení pouze lokálního extrému, nastavení limitů produkce aj.

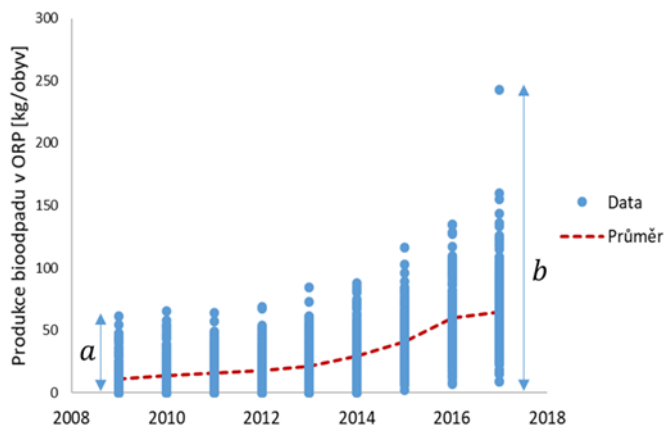
Produkce bioodpadu

Biologickým odpadem se dle Směrnice (EU) 98/2008 [4] rozumí biologicky rozložitelné odpady ze zahrad a parků, potravinářské a kuchyňské odpady z domácností, restaurací, stravovacích a maloobchodních zařízení a srovnatelný odpad ze zařízení potravinářského průmyslu. Odděleně separovaný bioodpad v současné době představuje významnou část KO. Například v České republice tvořil bioodpad 15 % KO v roce 2017 a jeho produkce má rostoucí charakter. Nicméně významná část biologického odpadu stále není separována a zůstává ve smíšeném komunálním odpadu (SKO). To potvrzují analýzy složení SKO z různých evropských zemí, např. 38 % bioodpadu v SKO je odhadováno pro Německo v roce 2017 [14] nebo 27 % pro Švýcarsko [15]. Některé studie nejsou zcela aktuální, ale celkový výstup vytváří představu o množství bioodpadu v SKO. Průměr v evropských zemích na základě 13 zvažovaných studií se blíží 33 % bioodpadu v SKO, rešerše je k dispozici v příspěvku [16]. Podle vývoje nakládání s odpady se Česká republika řadí přibližně k průměrným zemím také z hlediska účinnosti a produkce třídění odpadů, viz [17].

Lze předpokládat, že bioodpad v SKO většinou tvořen kuchyňským odpadem. Obvykle je zahradní odpad buď separován, nebo zpracováván v domácích kompostech. Tento předpoklad potvrzuje článek [18], průměrná hodnota potravinového odpadu v SKO v Rakousku se odhaduje na 25,1 %. Ve studii [19] bylo stanoveno množství biologického odpadu v SKO na 20,5 %. To znamená, že nelze předpokládat, že v SKO je zásadní množství zahradního odpadu.

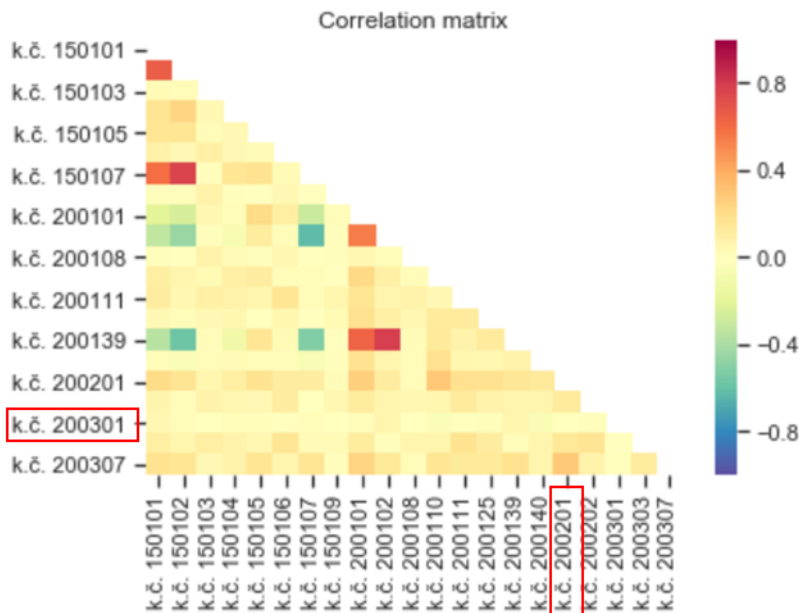
Produkce bioodpadu v ČR

Bioodpad je druh odpadu, který v České republice prošel v nedávné době významnou změnou legislativy. Od roku 2014 jsou obce povinny umožnit občanům separovat bioodpad [20]. Výsledkem je náhlé zvýšení produkce tohoto druhu odpadu. Toto chování je patrné v datech o produkci bioodpadu v ORP, viz obr. 2. Obr. 2 ukazuje vývoj produkce bioodpadu na jednoho obyvatele v České republice za dostupné časové období (2009–2017) pro 206 ORP, s výjimkou odlehlých hodnot (pro lepší zobrazení byly odstraněny horní a dolní decily). Ve sledovaném období je zřejmý rostoucí trend produkce bioodpadu, navíc v roce 2014 je patrný začátek trendové změny v důsledku legislativního zásahu. Rozsah produkce napříč ORP v roce 2009 (*a*) a 2017 (*b*) naznačuje, že mezi ORP a jejich reakcí na změnu systému existuje významný rozdíl.



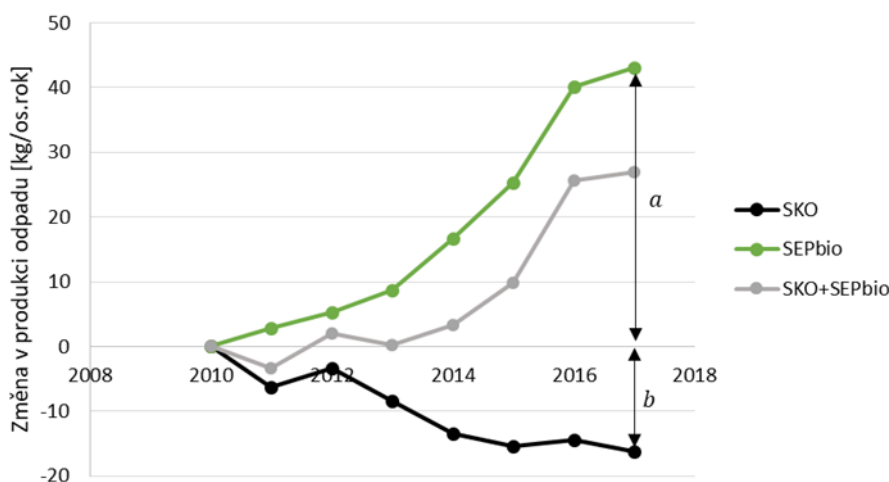
Obr. 2: Vývoj produkce bioodpadu v letech 2009–2017, ORP v ČR [16]

Spearmanův korelační koeficient pro vazbu produkce SKO a bioodpadu je pouze 0,15. Obr. 3 znázorňuje korelační matici vybraných katalogových čísel (k. č.) odpadu řazených ke KO. SKO (k. č. 200301) a bioodpad (k. č. 200201) jsou v obr. 3 zvýrazněny červeným rámečkem.



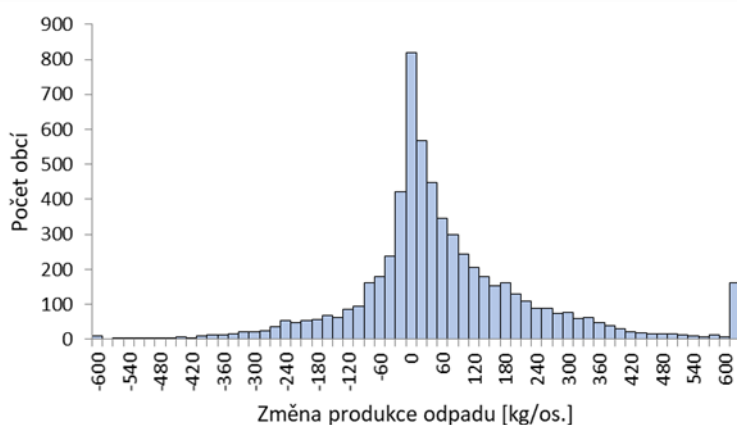
Obr. 3: Spearmanův korelační koeficient pro katalogová čísla KO, obce ČR v roce 2017

Změna produkce bioodpadu na úrovni ČR mezi lety 2010–2017 je znázorněna na obr. 4. Separovaný bioodpad je označena jako SEPbio. Lze pozorovat, že produkce bioodpadu v tomto časovém rozmezí narostla o více než 40 kg/os. a rok, na obr. 4 je tato hodnota vyznačena jako *a*. Oproti tomu pokles SKO je pouze přibližně o 15 kg/os. a rok, na obr. vyznačeno jako hodnota *b*. Na základě tohoto faktu nelze předpokládat, že by veškerý bioodpad byl separován z SKO. V bioodpadu se tedy pravděpodobně objevuje zcela nový odpadový proud – odpad ze zahrad.



Obr. 4: Změna v produkci SKO a bioodpadu v období 2010-2017, úroveň obcí

Obr. 5 znázorňuje změnu produkce SKO s vazbou na bioodpad na úrovni obcí. V tomto případě je medián změny produkce SKO + SEPbio 20,7 kg/os. a rok. Nárůst produkce bioodpadu byl tedy ve většině obcí vyšší než pokles SKO. Tomu nasvědčuje také nesymetrické zešíkmení histogramu. U bioodpadu tedy nelze předpokládat silnou vazbu na SKO, viz obr. 4. Jedná se patrně o bioodpad, který byl dříve zpracován v zahradních kompostérech. Tento odpad se tedy neprojevil v celkové produkci KO. Matematický model bude vycházet z předpokladu, že separovaný bioodpad vzniká z významné části novým odpadovým proudem. Bioodpad bude prognózován separátně bez vazby na SKO, což není vhodný přístup pro separovaný papír, plast a sklo, viz [21].



Obr. 5: Změna v produkci SKO a bioodpadu v období 2010–2017, úroveň obcí

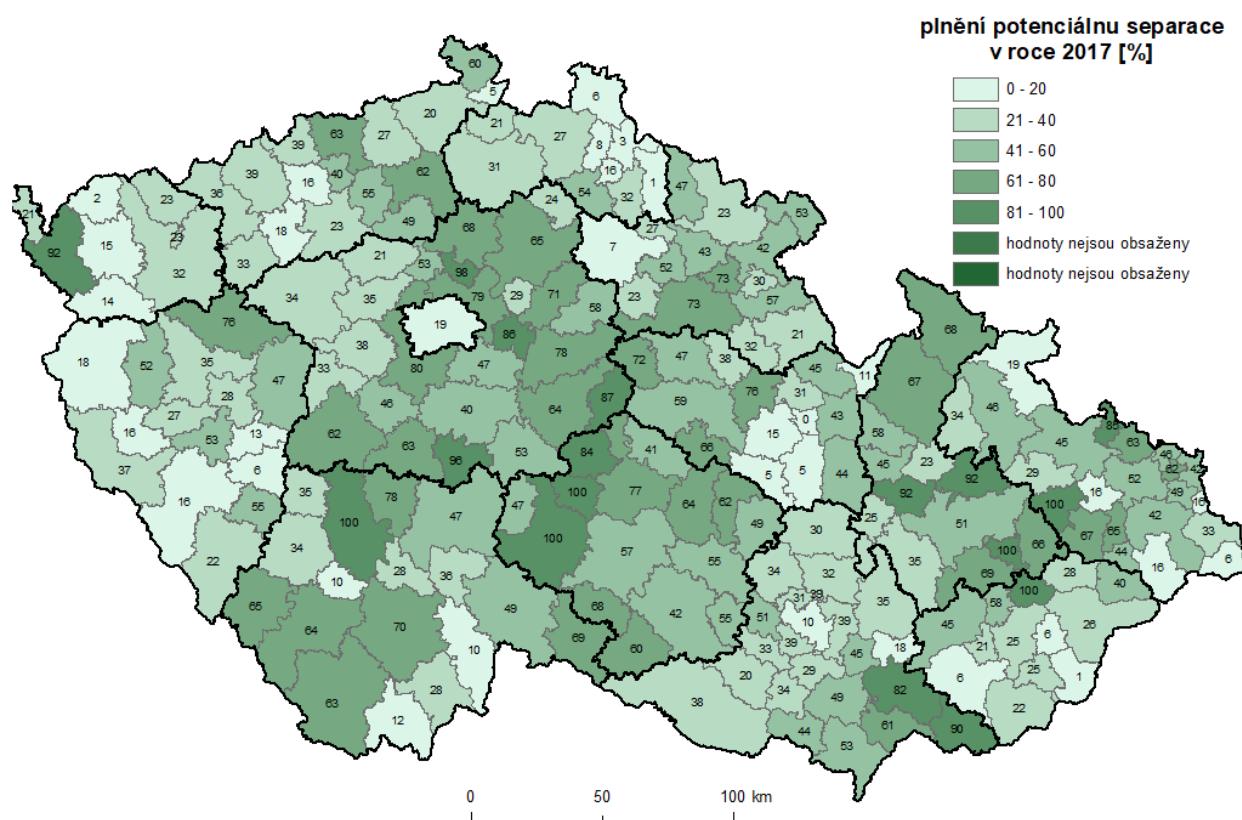
Bioodpad současně vykazuje specifickou vlastnost z důvodu změny trendu v historických datech. Produkce bioodpadu prošla v historii změnou, kterou je nutné pro prognózování následujícího vývoje

zohlednit. Produkce bioodpadu od roku 2014 významně narůstá, protože obce jsou od tohoto roku povinné zajistit občanům možnost bioodpadu separovat. Při prognózování odpadu se změnou trendu je jednou z vstupních informací potenciál separace. Už samotné nastavení této limitní hodnoty představuje velmi komplexní úlohu. Změnu trendu by bylo vhodné uvažovat u všech frakcí odpadu [16], u kterých došlo v průběhu dostupné časové řady k významné legislativní nebo technologické změně. Potenciál separace bioodpadu byl stanoven na základě složení SKO a literární rešerše zahraničních zkušeností o produkci zahradního odpadu. Potenciál separace zohledňuje typ zástavby, tab. 1.

Tab. 1: Stanovení potenciálu separace bioodpadu pro městskou a venkovskou zástavbu [16]

	Městská zástavba >8 obyv./č.p.	Venkovská zástavba 1-8 obyv./č.p.
Počet obyvatel	5 083 333	5 432 684
Kuchyňský odpad	60 kg/obyv. a rok	60 kg/obyv. a rok
Zahradní odpad	-	140 kg/cap/year
Potenciál bioodpadu	60 kg/obyv. a rok	200 kg/obyv. a rok

Plnění potenciálu separace se v současnosti významně liší napříč ORP, jak ukazuje obr. 6. V případě, že by přístup pro prognózování zohledňoval pouze historická data, území s nízkou současnou produkcí odpadu by podle analýzy trendu nenavýšila produkci ani v budoucnu. Řada obcí je totiž stále v procesu zavádění separace bioodpadu, což vede ke změnám trendu. Pro prognózu dat tohoto typu byl navržen přístup využívající myšlenku teorie kredibility [16]. Současně obr. 6 poukazuje na potřebu zpřesnění odhadu potenciálu separace, protože již v současnosti se řada ORP přibližuje své maximální hodnotě.

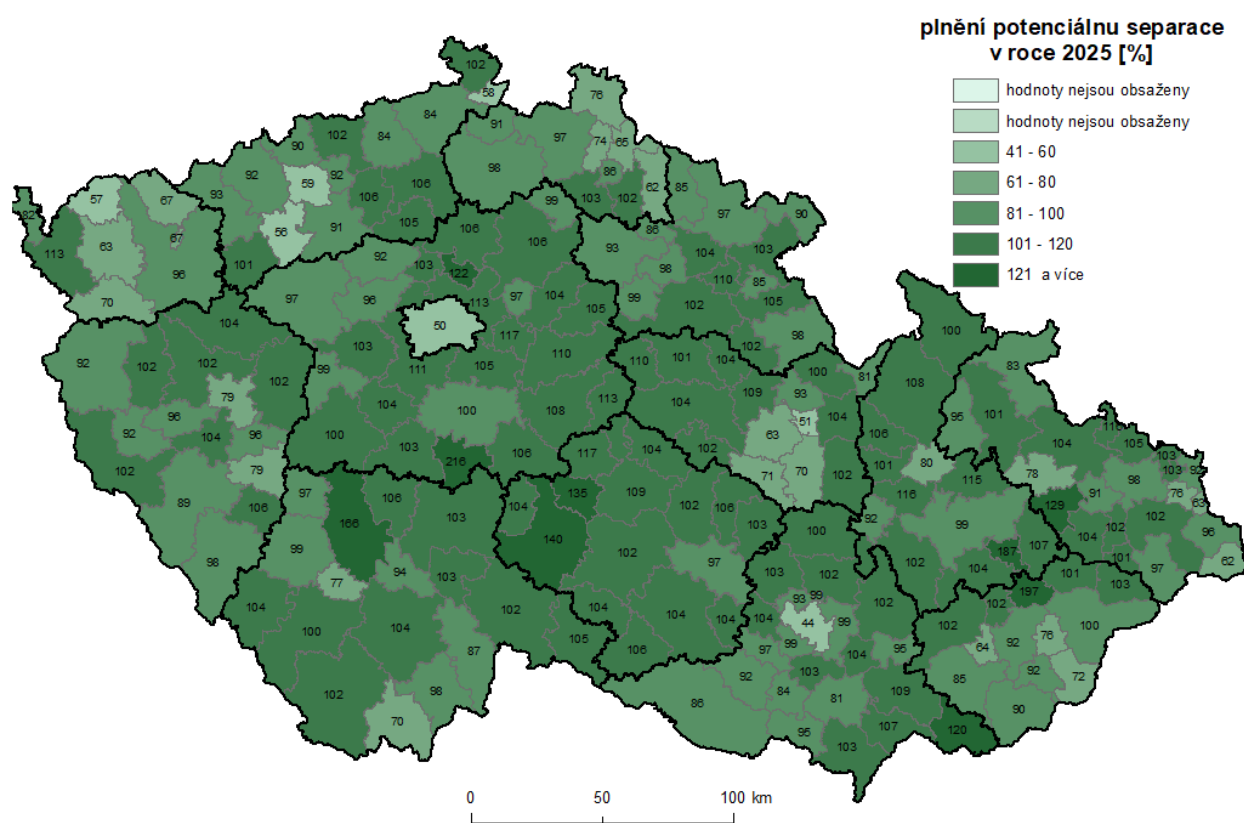


Obr. 6: Plnění potenciálu separace bioodpadu na úrovni ORP v roce 2017

Výsledky prognózy produkce bioodpadu

OH je v současnosti oblast, která podléhá řadě modifikací a změn. Změna legislativy, technologický pokrok nebo zásah do stávající infrastruktury může způsobit náhlou změnu v produkci odpadu. V takovém případě se stává obtížné odhadnout budoucí produkci odpadu na základě historických dat. Klasické metody nejsou schopny reagovat na náhlý skok v historických datech a prognóza může být zkreslena. Přístup představený v příspěvku [16] odhaduje budoucí produkci odpadu na konkrétním území s využitím kolektivní informace, využívá tedy myšlenku teorie kredibility [22].

Lze očekávat, že jednotlivé územní celky budou na změnu systému reagovat s různou efektivitou. Tohoto faktu využívá navržený přístup tím způsobem, že území reagující na situaci se zpožděním mohou přebírat informaci od těch, která již změnou prošla. Celý postup výpočtu prognózy produkce bioodpadu probíhá iterativně postupně pro každý predikovaný rok a každé sledované území. Modelovanou veličinou je plnění potenciálu separace. Podrobný popis algoritmu je k dispozici v příspěvku [16]. Očekávané plnění potenciálu separace v roce 2025 je znázorněno na obr. 7. Oproti výchozímu stavu z roku 2017 (obr. 6) většina ORP dosáhne svého potenciál separace bioodpadu. Vyskytují se také území, která podle prognózy s užitím zmíněné metodiky do roku 2025 překonají stanovený potenciál separace. Přístup je tedy částečně schopen reagovat na špatně stanovený potenciál. Je ale třeba věnovat pozornost v dalším postupu nastavení potenciálu separace.



Obr. 7: Prognóza plnění potenciálu separace bioodpadu na úrovni ORP v roce 2025

Následující tab. 2 shrnuje výsledky prognózy produkce bioodpadu pro ORP v Jihomoravském kraji. Výsledky jsou zobrazeny pro sledované roky 2017, 2020, 2025 a 2030 vždy v kg očekávané produkce vztahované na osobu a dále procentuální plnění potenciálu separace bioodpadu, který byl stanoven v tab. 1. Jak je vidět, poměrně vysoké zastoupení mají ORP, která do roku 2030 mírně překonají stanovený

potenciál separace, jak již bylo zmíněno. V dalším vývoji bude žádoucí se nastavení potenciálu separace věnovat podrobněji.

Tab. 2: Výsledky prognózy produkce bioodpadu pro ORP Jihomoravského kraje

ORP	2017		2020		2025		2030	
	Produkce [kg/os.]	Plnění [%]	Produkce [kg/os.]	Plnění [%]	Produkce [kg/os.]	Plnění [%]	Produkce [kg/os.]	Plnění [%]
Blansko	47,63	32,03	107,07	72,00	151,79	102,07	158,56	106,63
Boskovice	50,05	29,69	126,66	75,14	168,67	100,07	171,86	101,96
Brno	9,26	9,92	21,04	22,55	40,63	43,56	66,13	70,91
Břeclav	84,39	53,17	152,38	96,00	163,68	103,12	163,76	103,07
Bučovice	31,25	17,72	86,60	49,11	167,68	95,09	195,46	110,84
Hodonín	91,46	61,41	145,82	97,91	159,35	106,99	159,92	107,30
Hustopeče	89,65	49,36	113,82	62,67	147,10	80,99	156,44	86,14
Ivančice	55,37	32,57	112,81	66,35	165,32	97,24	171,45	100,84
Kuřim	44,29	30,55	87,92	60,66	135,44	93,44	145,22	100,19
Kyjov	143,41	81,91	191,09	108,22	191,23	109,23	191,23	108,49
Mikulov	72,29	43,87	140,77	85,42	157,05	95,30	161,65	98,09
Moravský Krumlov	35,16	20,29	103,48	59,72	158,60	91,54	168,50	97,25
Pohořelice	56,87	34,12	99,47	59,67	139,86	83,90	147,18	88,29
Rosice	81,54	51,19	148,86	93,44	165,69	104,01	166,24	104,28
Slavkov u Brna	77,45	45,30	148,74	86,99	178,36	104,31	182,87	106,95
Šlapanice	65,30	38,88	119,64	71,22	166,49	99,11	174,33	103,78
Tišnov	56,58	34,43	117,36	71,42	168,77	102,71	178,28	108,49
Veselí nad Moravou	150,32	89,92	200,71	118,06	200,71	120,05	200,72	118,77
Vyškov	54,05	34,94	116,80	75,51	157,04	101,52	166,04	107,34
Znojmo	57,58	37,53	93,73	61,10	131,72	85,87	140,72	91,73
Židlochovice	50,09	29,46	127,96	75,25	175,13	102,99	178,04	104,71

Závěr

Prognóza produkce bioodpadu vyžaduje specifický přístup z důvodu historické legislativní změny, která vedla ke změně trendu v produkci v ČR. Přístup aplikovaný na prognózu produkce bioodpadu vychází z myšlenky teorie kredibility. Hlavní přínos je především v tom, že jednotlivá území se inspirují chováním území ostatních, pokud sama nedisponují dostatečně vypovídající sadou historických dat. Zkušenosti o vývoji této frakce jsou tak předávány. V případě bioodpadu nebyla v současnosti prokázána vazba na SKO, a proto je prognózován zcela separátně od ostatních frakcí KO. Je pravděpodobné, že nárůst produkce bioodpadu je způsoben převážně zahradním odpadem, který byl dříve ukládán do zahradních kompostérů. V KO se tak objevuje zcela nový odpadový proud, což představuje další výzvy pro výzkum v této oblasti. Bližší vhled do problematiky by poskytla informace o tom, jak se daří separovat kuchyňský odpad. Dá se totiž očekávat, že do separovaného bioodpadu se začne přesouvat kuchyňský odpad. Podstatným bodem je zpřesnění odhadu potenciálu separace v závislosti na charakteru území.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory projektu "Strategické partnerství pro environmentální technologie a produkci energie" reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008413 financovaného z EFRR.

Reference

- [1] Zaman A.U. (2016). A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems. *Journal of Cleaner Production*, 124, 41-50. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.086.
- [2] Khatib I.A. (2011). Municipal solid waste management in developing countries: Future challenges and possible opportunities. *Integrated Waste Management*, 2, 37-48. DOI: 10.5772/16438.
- [3] Prieto-Sandoval V., Jaca C., Ormazabal M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605-615. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.224.
- [4] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic (Text s významem pro EHP)
- [5] Yi S., Jang Y.-C., An A.K. (2018). Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste-to-energy technologies. *Journal of Cleaner Production*, 176, 503-511. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.103.
- [6] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/850 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů.
- [7] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/851 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech.
- [8] Beigl P., Lebersorger S., Salhofer S. (2008). Modelling municipal solid waste generation: A review. *Waste Management*, 28(1), 200-214. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.12.011.
- [9] Goel S., Ranjan V.P., Bardhan B., Hazra T. (2017). Forecasting solid waste generation rates. *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management*, 35-64. Singapore: Springer Singapore. DOI: 10.1007/978-981-10-2410-8_3.
- [10] Rybová K., Slavík J., Burcin B., Soukopová J., Kučera T., Černíková A. (2018). Socio-demographic determinants of municipal waste generation: case study of the Czech Republic. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1884-1891.
- [11] Kováčová A., Louda J., Rybová K. (2011). Demographic changes and prediction of municipal waste. *Waste forum*, 4, 208-2017.
- [12] Mwenda A., Kuznetsov D., Mirau S. (2014). Time-series Forecasting of Solid Waste Generation in Arusha – Tanzania. *Mathematical Theory and Modeling*, 4(8). ISSN 2224-5804.
- [13] Ghinea C., Drăgoi E.N., Comăniță E.-D., Gavrilescu M., Câmpean T., Curteanu S., Gavrilescu M. (2016). Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. *Journal of Environmental Management*, 182. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.026.
- [14] Kaw Landkreis Hameln-Pyrmont Hausmüllanalyse 2017, 2017. [online]. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: https://kaw.hamelnpyrmont.de/media/custom/315_768_1.PDF?1510135183.
- [15] SAEFL - Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape. (2003). A survey of the composition of household waste 2001/02. [online]. [cit. 2019-01-29]. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/waste/publications-studies/publications/composition-household-waste-2001-02.html>
- [16] Smejkalová V., Šomplák R., Nevrlý V., Burcin B., Kučera R. (2020). Trend forecasting for waste generation with structural break. *Journal of Cleaner Production*. (In Review).
- [17] Eurostat (2019). European Statistical Office, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00110/default/table?lang=en>

- [18] Lebersorger S., Schneider F. (2011). Discussion on the methodology for determining food waste in household waste composition studies. *Waste Management*, 31(9–10), 1924-1933. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.05.023.
- [19] Vogel E., Steiner M., Quickert A. (2009) Siebgestützte Restmüllanalysen im Land Steiermark, 2009. [online]. [cit. 2019-01-29]. http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10168259_4336659/4dfe9a05/Endbericht%20Steiermark_2008.pdf
- [20] Novela zákona o odpadech 229/2014 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů.
- [21] Pavlas, M., Šomplák, R., Smejkalová, V., Stehlík, P. (2020). Municipal Solid Waste Fractions and Their Source Separation: Forecasting for Large Geographical Area and Its Subregions. *Waste and Biomass Valorization*, 11 (2), 725-742. DOI: 10.1007/s12649-019-00764-0.
- [22] Mahler H.C, Dean C.G. (2001). *Foundation of casualty acturial science*, Chapter 8: Credibility. 4th ed., 485-659, ISBN 978-0-96247-622-8.