



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Svjetlana Vujović

**DOPRINOS ANALIZE TOKOVA FOSFORA
RAZVOJU CILJNO ORIJENTISANOG
UPRAVLJANJA BIORAZGRADIVIM OTPADOM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2020.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	мрр Свјетлана Вујовић
Ментор, МН:	др Немања Станисављевић, ванредни професор
Наслов рада, НР:	Допринос анализе токова фосфора развоју циљно оријентисаног управљања биоразградивим отпадом
Језик публикације, ЈП:	српски (латиница)
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна Покрајина Војводина
Година, ГО:	2020. година
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страница/цитата/табела/слика/табелна слика/прилога)</small>	7 / 133 / 117 / 15 / 5 / 35 / 3
Научна област, НО:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Научна дисциплина, НД:	Инжењерство заштите животне средине
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	фосфор; анализа токова материјала; анализа токова супстанци; биоразградиви отпад; земља у транзицији
УДК	
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	Нема
Извод, ИЗ:	Циљ ове дисертације је развој модела заснованог на анализи токова материјала (МФА) и анализи токова супстанци (СФА) система управљања биоразградивим отпадом са нагласком на управљање фосфором као ресурсом. У земљама у транзицији као што је Србија управљање биоразградивим отпадом представља посебан проблем јер се доводи у директну везу са емисијама гасова са ефектом стаклене баште и генерисањем процедурних вода. Како би се развила стратегија управљања биоразградивим отпадом у складу са захтевима ЕУ директива, развијени модел је примењен на систем управљања биоразградивим отпадом у Србији, и два алтернативна сценарија. На основу резултата примењеног модела, сва три развијена сценарија управљања биоразградивим отпадом су евалуирана и извршено је њихово поређење.
Датум прихватања теме, ДП:	16.01.2017.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Горан Вујић, редовни професор
	Члан: Др Јохан Фелнер, ванредни професор
	Члан: Др Горан Бошковић, доцент
	Члан: Др Бојан Батинић, доцент
	Члан, ментор: Др Немања Станисављевић, ванредни професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph publication
Type of record, TR :	Textual Printed Material
Contents code, CC :	PhD Thesis
Author, AU :	Svjetlana Vujović, MSc
Mentor, MN :	Dr. Nemanja Stanisavljević, Associate Professor
Title, TI :	Contribution of phosphorus flow analysis for development of goal-oriented biodegradable waste management
Language of text, LT :	Serbian (Latin)
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2020
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	7 / 133 / 117 / 15 / 5 / 35 / 3
Scientific field, SF :	Environmental Engineering and Occupational Safety and Health
Scientific discipline, SD :	Environmental Engineering
Subject/Key words, S/KW :	Phosphorous; Material Flow Analysis; Substance Flow Analysis; Biodegradable waste; Transition country
UC	
Holding data, HD :	The Library of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Note, N :	None
Abstract, AB :	<p>The aim of this dissertation is biodegradable waste management system model development based on material flow analysis (MFA) and substance flow analysis (SFA) with an emphasis on phosphorus management as a resource. In transition countries like Serbia, biodegradable waste management is a particular problem due to direct linkage with greenhouse gas emissions and leachate generation. In order to develop a biodegradable waste management strategy in accordance with the requirements of EU directives, developed model was applied to the biodegradable waste management system in Serbia, and two alternative scenarios. Based on the results of the applied model, evaluation and comparison of all three developed scenarios of biodegradable waste management is performed.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	16.01.2017.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Dr. Goran Vujić, full professor
Member:	Dr. Johann Fellner, Associate Professor
Member:	Dr. Goran Bošković, Assistant Professor
Member:	Dr. Bojan Batinić, Assistant Professor
Member, Mentor:	Dr. Nemanja Stanisavljević, Associate Professor
	Mentor's sign

Zahvalnica

Posebnu zahvalnost dugujem mentoru profesoru dr Nemanji Stanisavljeviću na posvećenom radu i pomoći u svakom koraku izrade doktorske disertacije. Veliku zahvalnost dugujem profesoru dr Johanu Felneru, čije su sugestije i pomoć bili od neizmernog značaja za izradu doktorske disertacije.

Zahvaljujem se ostalim članovima Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije koji su svojim korisnim predlozima i sugestijama doprineli izradi doktorske disertacije.

Zahvaljujem se svim kolegama i prijateljima na stručnoj i emotivnoj podršci, a posebnu zahvalnost dugujem koleginicama Bojani, Bojani i Maji. Zahvaljujem se i dragoj kumi Neni, profesorici srpskog jezika i književnosti na detaljnoj recenziji.

Naposletku, najveću zahvalnost dugujem svojim najdražima, Ljubi i Ljubici, kao najvećoj inspiraciji za rad, kao i svojim roditeljima i bratu, koji su mi pružali punu podršku tokom celog perioda izrade doktorske disertacije.

Istraživanje u okviru doktorske disertacije realizovano je tokom projekta bilateralne naučne i tehnološke saradnje između Republike Srbije i Republike Austrije za period 2016–2017. godine pod nazivom: „Razvoj i evaluacija scenarija za upravljanje biorazgradivim otpadom u Srbiji sa aspekta energetskog iskorišćenja i održivog upravljanja fosforom“.

REZIME

U zemljama u tranziciji, kao što je Srbija, osnovni ciljevi upravljanja otpadom koji se odnose na zaštitu zdravlja ljudi i životne sredine i očuvanje resursa nisu u potpunosti dostignuti. Baze podataka su oskudne, nepotpune i nepouzdana, a nedostaje i stručnog znanja i praktičnog iskustva. Upravljanje biorazgradivim otpadom predstavlja poseban problem jer se dovodi u direktnu vezu sa emisijom gasova sa efektom staklene bašte i generisanjem procednih voda. Srbija kao zemlja kandidat za članstvo u EU mora da ispuni rigorozne uslove koje nameće potencijalno članstvo. Da bi se ispunili ciljevi definisani direktivama EU, upravljanje biorazgradivim otpadom mora proći kroz značajne promene. Implementacija ovih neophodnih promena u okviru sistema takođe će uticati na tokove fosfora, koji predstavlja neobnovljiv i esencijalni resurs, bez supstitucije. S tim u vezi, cilj istraživanja jeste razvoj modela kojim bi se omogućilo modelovanje i donošenje odluka prilikom upravljanja biorazgradivim tokovima otpada na takav način da se uključe i tokovi fosfora.

Za ovu analizu korišćena je kombinacija dve metode: analiza tokova materijala (MFA) i analiza tokova supstanci (SFA), što se pokazalo kao efikasna metoda za donošenje odluka prilikom upravljanja resursima. Primenom MFA su identifikovani svi tokovi biorazgradivog otpada, analizirani procesi koji dovode do njihovih transformacija i predviđeni uticaji implementiranih procesa na sistem. Sa istom metodologijom, primenjenom na nivo supstanci, kroz SFA identifikovani su i analizirani tokovi fosfora. Razvijen model je primenjen na trenutno stanje sistema za upravljanje otpadom u Srbiji i dva alternativna scenarija. Rezultati su prikazani za ukupne masene tokove i za tokove fosfora u okviru njih. Nakon toga je izvršena evaluacija i poređenje dobijenih rezultata.

Konačan rezultat ovog istraživanja jeste definisan model koji kombinuje MFA i SFA u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom i omogućava upravljanje fosforom kao resursom kroz razvoj alternativnih modela upravljanja. Opšti zaključak je da su tokovi biorazgradivog otpada i fosfora u Srbiji uglavnom linearni, resursi se troše, a unapređenje upravljanja ovim tokovima ima veliki potencijal za poboljšanje kvaliteta životne sredine i doprinosi ispunjenju zahteva EU. U svim oblastima upravljanja otpadom donošenje odluka je kompleksan zadatak, stoga ovo istraživanje ima za cilj da modeluje uticaj uvođenja novih tehnologija u tretman biorazgradivog otpada, kako bi se dostigli ciljevi upravljanja otpadom i transformacije tokova fosfora. Dobijeni rezultati pružaju informacije koje su korisne za budući razvoj održivog upravljanja fosforom u Srbiji, ali i u drugim sličnim ekonomijama. Analizom potencijala otpada kao izvora fosfora može se uticati na upotrebu i uvoz mineralnih đubriva. Buduća analiza bi mogla pokazati koliko se može smanjiti upotreba mineralnih P đubriva.

Ključne reči: fosfor; analiza tokova materijala; biorazgradivi otpad; zemlja u tranziciji

EXTENDED ABSTRACT

In developing and transition countries, such as Serbia, there are problems in the functioning of waste management systems, databases are scarce, incomplete and unreliable, and there is a lack of expertise and practical experience (Vujic et al., 2010). This waste management practice leads to a number of problems, such as landfilled biodegradable waste without pretreatment. This practice is neither in line with European regulations where disposal of untreated biodegradable waste on landfills is forbidden, nor with the adopted The Regulation of Waste Disposal. The problem is even bigger because the landfills are mainly not sanitary, they do not have measures designed to reduce the negative impact on the environment of this category of waste. However, biodegradable waste can also be considered as a resource, if we consider the containing nutrients, especially phosphorus as a non-renewable and limited resource.

Until now tools that allow the modelling and decision-making in the management of biodegradable waste flow, in such a way to engage phosphorus flows, have not been developed. The combination of Material Flow Analysis (MFA) and Substance Flow Analysis (SFA) aims to develop a new method for designing and evaluating biodegradable waste management system for sustainable phosphorus management. The implemented procedure for model development has been performed by applying the following steps:

Defining the system. All biodegradable waste streams go through the processes of generation, collection, transformation and disposal that are already established within the existing waste management system. The analysis does not include the segment of waste collection and transport due to the difficulty of analyzing the collection of biodegradable waste separately from other waste streams. The most significant biodegradable waste flows come from the consumption sectors, industry, agriculture, wastewater treatment plant and forestry. The biodegradable waste management system affects the systems to which it is connected through transfer of emissions and resources.

Defining the system boundaries and functional units. The analysis has been performed for the Republic of Serbia. Serbia is a country in transition with a population of 7.19 million, surrounded by land. More than 40% of the population lives in rural settlements, which represents 96% of the total number of settlements. It covers an area of 88,499 square kilometers, 65% is agricultural land, while the rest is dominated by forests. For the purposes of this research, the spatial boundary is defined as the administrative boundary of the Republic of Serbia. The one-year time limit is has been applied for mass balance and the analysis refers to 2015. However, due to the limited information availability, data have been collected for the period from 2013 to 2018. The functional unit of the system is the total amount of generated biodegradable waste, which includes the following flows: 1. biodegradable waste from municipal solid waste, 2.

biodegradable industrial waste (wood processing, food industry waste, biodegradable fraction of packaging waste), 3. sludge from wastewater treatment plants, 4. unused forest residues and 5. agricultural residues (animal husbandry and crop production). Other non-biodegradable categories of municipal and industrial waste (such as plastics, glass, metals, ash and other non-biodegradable waste fractions) are not taken into account in the analysis.

Defining material flows: Biodegradable waste in MSW includes total biodegradable waste generated in households and similar waste. Data on the amount and composition of municipal waste, and thus the content of biodegradable waste, have been obtained from various studies. Specifically, a study on the morphological composition and amount of municipal waste conducted by the Faculty of Technical Sciences of the University of Novi Sad in 2009 (Vujic et al., 2010) and a recent IMG analysis (2015) for municipalities in Serbia are used. According to the second study, 2.4 million tons of municipal solid waste is generated annually in Serbia. About 50% of municipal waste is garden green and kitchen waste, and if paper and cardboard are included, the total amount of biodegradable waste is 60%.

During agricultural production, different categories of waste are generated depending on the type, area and method of production. In general, different waste materials are generated in agriculture: plastics and plastic packaging (non-hazardous and dangerous e.g. from pesticides), cardboard and paper, metal, wood, glass, rubber, ash, animal waste and crop residues, medical - veterinary waste, construction waste, etc. However, the subject of this research is only biodegradable waste generated during animal husbandry and residues during crop production. For this research, all materials that end up in the waste management system are considered, as well as all by-products and residues that are not used properly. For example, two biomass flows are defined: 1. included in the analysis - biomass that can be collected - biomass potential - upper parts of the stem, manure, branches in the orchard, etc.) and 2. not included in the analysis - biomass left after agricultural production that cannot be collected (roots, lower part of the stem, etc.).

Discharges of untreated wastewater are directly related to surface and groundwater pollution in Serbia. Large cities, such as the capital Belgrade with more than two million inhabitants, do not have operating wastewater treatment plants. According to state statistics, only 60% of households are connected to the public sewer and generate 400 million cubic meters of municipal wastewater (RZS 2017a). All collected wastewater should be treated, but currently there is not a sufficient number of wastewater treatment plants, and mostly wastewater is only collected without subsequent treatment. Only 10% of wastewater is treated, out of which primary treated is 10%, secondary treated is 71%, and tertiary treated is 19% (PSUGZ 2015, RZS 2017a, RZS 2017b). Currently, according to the water management strategy, 32 treatment plants

are in operation. Most plants do not operate with the capacity and efficiency with which they have been designed (SGRS 2017).

Industrial biogenic waste mainly includes waste generated in the food industry and the wood processing industry. The annual amount of industrial biogenic is more than 300,000 tons. Waste generated by wood processing amounts to 37,000 tons (RZS 2012a; RZS 2012b). These quantities represent official data on the amount of waste collected and do not take into account treated waste or used waste within the industry itself, so it has been excluded from the analysis of this research. Forests cover about 2.3 million hectares or one third of the total territory (RSZ 2017a). The total amount of wood residues in the forests is estimated at 1.1 million m³. However, part of the forest waste is already used for various purposes, such as firewood. Unused forest waste is estimated at 0.6 million m³ (Energy Saving Group 2007).

Defining the processes: Biodegradable waste management system consists of a treatment process (material transformation) and a disposal process (material storage). Treatment processes include biological, physical and thermal methods of waste treatment, while disposal processes include waste disposal processes in sanitary and other landfills. The system consists of four main waste treatment processes: 1. Biological treatment, 2. Thermal treatment, 3. Recycling and 4. Disposal.

After conducted material flow analysis, the phosphorus flows are analyzed. The amount of phosphorus is usually calculated on the basis of concentrations. Phosphorus concentrations in each flow vary in different countries and depend on the method of production, generation or level of treatment (Cordell et al., 2011). Due to the unavailability of specific data for Serbia, the values of P flows and concentrations from the relevant literature are used in this research. In particular, mass flows P for different categories of biodegradable waste are calculated using different literature data (Cordell et al., 2011; Tompkins 2006).

Data uncertainty in MFA arises from working with unreliable or conflicting data, the variability of certain flows and concentrations, and flows that can only be estimated. To estimate the uncertainty of the data, the method presented in Laner et al., (2015) and applied by Klinglmair et al., (2015) is used. Here, the data sources are divided into five levels of uncertainty and the corresponding coefficients of variation are assigned. The coefficients of variation depend on the data source: 15% for data from national official statistics from the year for which the research is conducted, 30% for data from national official statistics with a deviation of 1-5 years from the selected year, 45% for data from scientific literature, 60% for plant operator information and 75% for expert assessment.

The results of the analysis are presented within the STAN software (Cencic and Rechberger, 2008). This program has been specially developed for the needs of MFA and

enables transparent balancing, data reconciliation and visualization of systems at the level of goods and substances, taking into account data uncertainty.

The development of alternative scenarios for the management of biodegradable waste streams is primarily based on the requirements that must be met during the improvement of the waste management system within each scenario. The system improving during the development of alternative scenarios are: 1. Reduction to 35% of biodegradable waste landfilled in 2008, 2. Increasing the amount of waste collection to 90%, 3. Construction of sanitary landfills for 90% of the population, 4. Generated sludge amount when 85% of the population is connected to the sewerage network and appropriate treatment. Further defining of alternative scenarios has considered two directions of improving the biodegradable waste management system. The first is resource conservation where all activities are aimed at reusing as many resources as possible either as a secondary raw material or as a new resource. The second is the maximum utilization of energy contained in waste. In the scenarios, future changes in the amount and composition of generated waste are related to changes in the number of inhabitants, changes in the future composition of waste, changes in the number and type of livestock, arable land and crops, etc are not analyzed. The amount of all generated biodegradable waste streams is unchanged in all scenarios, except in the case of sludge from wastewater treatment plant where the amount of wastewater is unchanged but the amount of separated sludge is increased.

Scenario I, which aims to conserve resources, is an alternative scenario whose goal is to predict future material flows from processes that enable reuse and recover of materials. Although this can be achieved by a variety of processes, no technology demanding and economical processes are chosen. Therefore, in addition to meeting the set general objectives, in this scenario the implementation of low-cost and low-tech processes are planned. In Scenario II, in order to achieve the goal of energy conservation, materials with energy potential for the production of heat and electricity are defined. Energy production requires more complex transformation processes, which results in a scenario with more economically and technically demanding processes implemented.

The analyzed shortcomings in biodegradable waste management and defined indicators are divided into two groups. One concerns the impact on the goal of waste management related to the environment protection and human health, and the other concerns the impact on the goal of conserving resources, the use of waste potential as a resource. The defined indicators on the basis of which the evaluation and comparison of results is performed are: Indicator Z1-1 - Amount of biodegradable waste and P entering landfilling process through flow biodegradable from MSW; Indicator Z1- 2 - The amount of biodegradable waste and P entering landfilling process through flow sludge from wastewater treatment plant; Indicator Z2 - Emission of materials and P from landfills caused by unsanitary waste disposal; Indicator Z3 - Emissions of materials and P from

agriculture; Indicator R1 - Decrease in stocks of material and P in landfills; Indicator R2 - 1 - Amount of reused compost and P; Indicator R2 - 2 - Amount of reused sludge and P; Indicator R3 - Potential ash as resource.

The results of the research show that the total amount of material entering the biodegradable waste management system is 32,000,000 t·yr⁻¹, of which: biodegradable MSW 1,600,000 t·yr⁻¹, biodegradable industrial 240,000 t·yr⁻¹, sludge from PTOV 1,000,000 t·yr⁻¹, unused forest biomass 130,000 t·yr⁻¹ and agricultural residues 29,000,000 t·yr⁻¹. The system output flows represent air emissions of 280,000 t·yr⁻¹, material with market value of 72,000 t·yr⁻¹, flow into soil and groundwater 9,900,000 t·yr⁻¹, unused forest biomass 130,000 t·yr⁻¹, and material "recycled" within agriculture 22,000,000 t·yr⁻¹. The total increase in the system stock is 300,000 t·yr⁻¹.

The most significant flow of biodegradable waste is agricultural residues, which represent more than 90% of the total biodegradable flows (manure dominates). The analysis shows that only 65% of the manure is used as fertilizer in an appropriate way. Unused potential of crop residues (6,300,000 t·yr⁻¹) represents 20% of total agricultural residues or 70% of total crop residues. The remaining crop residues are "used by-product" flows (1,800,000 t·yr⁻¹) and "treated" agricultural residues (340,000 t·yr⁻¹). The first flow is mainly used as animals bedding and is usually mixed with manure, and then applied in "agricultural production". The second flow is used as biomass for energy production in "thermal treatment". The second most important flow of biodegradable waste is biodegradable waste in MSW. Only 3% of this category is composted (49,000 t·yr⁻¹), and only 1% is recycled as paper and cardboard (16,000 t·yr⁻¹). The rest is disposed of in landfills (1,490,000 t·yr⁻¹). Sludge from wastewater treatment plants is also a significant flow. It is expected that the amount of treated wastewater will be increased in the future (SGRS 2017), which will result in an increase in the amount of sludge. The total amount of forest residue is estimated at 1.1 million m³. However, one part of forest residue is already used for various purposes (Energy Saving Group 2007), so that unused forest residues amount to 130,000 t·yr⁻¹. The largest "losses" of biodegradable waste also occur in the agricultural sector. The analysis have showed that 35% of the manure (especially the liquid phase) ends up in the environment. This is a consequence of the traditional system of keeping cattle and small farms, where only solid manure is collected and stored in the open ground (RZS 2013).

Available data emphasize the need to improve manure management (ARCOTRASS 2006, Cooper et al., 2010, Cvetković et al., 2014, SGRS 2014, IPARD II 2019). Serious problems are caused by pig farms, where manure is stored in large lagoons with a high risk of surface and groundwater pollution (ARCOTRASS 2006, Cooper et al., 2010). Additional problems arise due to the tendency of small farms to store manure for a long time directly on the ground without waterproof barriers. Such management has a direct impact on groundwater quality through diffuse pollution (IPARD II 2019). In addition, due

to traditional agricultural practices, sheep and goat manure is difficult to collect (Cvetković et al., 2014). However, this flow is not necessarily considered an emission into the environment, but more like a lost potential. Unused biomass left in the field, which could be collected without endangering agricultural production, is considered only as an alternative energy source with the greatest energy potential in Serbia (SGRS 2015).

The total amount of P entering the biodegradable waste management system is 55,000 t P·yr⁻¹ of which: biodegradable in MSW 3,800 t P·yr⁻¹, biogenic industrial waste 310 t P·yr⁻¹, sludge from wastewater treatment plants 220 t P·yr⁻¹, unused forest residue 13 t P·yr⁻¹ and agricultural residues 50,000 t P·yr⁻¹. The system output flows represent air emissions 0.8 t P·yr⁻¹, material with market value of 85 t P·yr⁻¹, flow into soil and groundwater 10,000 t P·yr⁻¹, forest unused biomass 13 t P·yr⁻¹, and material that is “recycled” within agriculture 44,000 t P·yr⁻¹. The total increase in the system stock is 510 t P·yr⁻¹.

At the P level, the most significant P flow is present in agricultural residues. Currently, the largest P losses (0.86 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹) occur in agriculture mainly due to very poor environmental management on existing farms. This is in line with the data of Cooper et al., in 2010, where Serbia has been recognized as one of the largest contributors to phosphorus emissions in the Danube, partly due to the pollution from livestock farms. Comparing the results from similar studies for other European countries (such as Austria or Denmark), it can be seen that their phosphorus emissions from agriculture are significantly lower or even non-existent. In Denmark, in the agricultural sector, only emissions of 0.07–0.22 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹ are associated with emissions during leaching and soil erosion (Klinglmair et al., 2015). Livestock P emissions do not exist at all. A similar situation is observed in Austria, where only the emission caused by erosion of 2.2 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹ is associated with phosphorus losses from crop cultivation (Egle et al., 2014). However, it should be noted that the agricultural sector in Serbia is much more important than in Austria in terms of the overall flow of P (Zoboli et al. 2015). However, Serbia is not the only country where this flow exists. In China, from livestock farms 0.5 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹ is discharged into surface water (Liu et al., 2004; Li et al., 2020).

Recycling of P from MSW is negligible. In Serbia, composting of biodegradable waste in MSW contributes to the P recovery of only 0.01 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹. This is a negligible value in contrast to Austria where 0.42 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹ and Denmark where 0.08 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹ is reused through separately collected municipal and industrial biodegradable waste (Egle et al., 2014, Klinglmair et al. 2015). According to other available studies, differences in the landfilling process are also present (Seyhan 2006, Egle et al., 2014, Senthilkumar et al., 2014, Klinglmair et al., 2015). Due to the lack of appropriate technical barriers, landfilling results in phosphorus emissions into the environment (N'Goran et al. 2019).

Only small amount of P is present in the sludge from wastewater treatment plants, 0.03 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹. This is a consequence of the predominantly present primary

and secondary wastewater treatment (ICPDR 2009). The amount of sludge will increase in the future. This will directly affect the increase of potentially available P for further management. Provided that a tertiary treatment is applied, 90% of the P present in the wastewater can be recovered and, after appropriate treatment, applied to the soil as fertilizer. With this level of wastewater treatment, the total potential P for reuse from wastewater would be 3,200 tons per year ($0.5 \text{ kg P} \cdot \text{cap}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$).

In Serbia, P from sewage sludge is currently not used in any way, as is the case in many EU Member States. For example, in Denmark, 50% to 75% of P from wastewater is used in agriculture (Klinglmair et al., 2015), in France, 62.9% (Senthilkumar et al., 2014), and in Austria 40%. The reasons why P from sludge in Serbia is not recycled have been identified as: 1. Most generated wastewater is not treated due to the lack of appropriate technical infrastructure, therefore no significant amounts of sludge are generated; 2. Lack of regulations on the use of sewage sludge in agriculture; 3. Lack of good practice, technology; 4. Economic reason.

In order to show the level of P recycling in Serbia, a comparison with the situation in different countries has been made. The total amount of P per capita in biodegradable waste from MSW in Serbia is similar to other countries. However, the amount of recycled P from this flow varies and is the highest in Austria (77%) and the lowest in Serbia (2%). The total amount of P contained in wastewater is slightly lower in Turkey and Serbia than in other countries, while the amount of P recovered in the sludge is several times lower (11% Turkey and 4% Serbia). The amount of P recycled from sludge is 0% in Serbia and 2% in Turkey. This amount in other countries ranges from 36-43% P found in wastewater.

P emissions and losses from livestock farms represent the largest losses in the biodegradable waste management system with the greatest potential for reuse. Applying appropriate agricultural practices in manure storage to prevent environmental contamination can be seen as a simple solution. However, as more than two million livestock farms are registered in Serbia (mostly small farms), the implementation, control and supervision of these measures are necessary. Utilization of P from crop residues is considered a specific problem, because that flow is not considered an emission. If biomass is burned as an alternative fuel, P could be recovered from ash. In the case of a mono-incinerator in which single flow can be burned, the ash could be used directly as fertilizer. This does not apply to ash from incinerators where sewage sludge or MSW is burned, because the content of heavy metals limits its use. This ash could be used as a raw material in the production of P fertilizers.

In scenario 1, the total amount of material entering the biodegradable waste management system has not changed in relation to the status quo, except in the case of generated sludge from wastewater treatment which is $710,000 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$, other flows are: biodegradable in MSW $1,600,000 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$, biogenic industrial waste $240,000 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$, unused forest biomass $130,000 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$ and agricultural residues $29,000,000 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$. Materials exiting

the system represent air emissions of 560,000 t·yr⁻¹, material with market value 790,000 t·yr⁻¹, flow into soil and groundwater 4,200,000 t·yr⁻¹, forest unused biomass 130,000 t·yr⁻¹, and material that is "recycled" within agriculture 25,000,000 t·yr⁻¹. The total increase in the system stock is 1,200,000 t·yr⁻¹. The most significant flow of biodegradable waste is still agricultural residues. The amount of manure that can be adequately used as fertilizer has increased to over 80% (17,000,000 t·yr⁻¹). The amount of unused potential crop residues remained the same (6,300,000 t·yr⁻¹) and still represents 20% of total agricultural residues or 70% of total crop residues. In this scenario the amount of composted waste is increased to 65% (970,000 t·yr⁻¹). The amount of recycled paper and cardboard is increased 3 times (42,000 t·yr⁻¹). The remaining landfill is 502,000 t·yr⁻¹. Also, within the landfill process, there have been significant changes in this scenario. The total amount of waste entering the landfilling process has been reduced (1,300,000 t·yr⁻¹). As the amount of waste disposed of in sanitary landfills has increased, the amount of waste considered as system stocks has also increased, thus reducing the total emissions from this subsystem to 130,000 t·yr⁻¹.

The total amount of P in scenario 1, which enters the biodegradable waste management system, did not change in relation to the current situation, except in the case of the generated amount of sludge from wastewater treatment plants (2,300 t P·yr⁻¹). Other flows are: biodegradable in MSW 3,400 t P·yr⁻¹, biogenic industrial waste 310 t P·yr⁻¹, unused forest biomass 13 t P·yr⁻¹ and agricultural residues 50,000 t P·yr⁻¹. P exits the system through air emissions (gases and water vapor) 1.6 t P·yr⁻¹, material that potentially has a market value of 1,700 t P·yr⁻¹, flow into soil and groundwater 3,800 t P·yr⁻¹, forest residue 13 t P·yr⁻¹, and material that is "recycled" within agriculture 48,000 t P·yr⁻¹. The total increase in the system stock is 3,300 t P·yr⁻¹.

The most significant P flow is present in agricultural residues. P losses from the agricultural sector as a result of emissions from existing farms have been reduced and now amount to 3,400 t P·yr⁻¹. 2,300 t P·yr⁻¹ or about 140 kg P·cap⁻¹·yr⁻¹ are present in sludge from wastewater treatment plants. Due to the potential use of sludge for soil conditioning purposes, 700 t P·yr⁻¹ is recycled while the rest is disposed of in a landfill. A total of 3,700 t P·yr⁻¹ represents stock in the system. The largest amount of P is in biodegradable MSW and sludge, in both flows of 1,600 t P·yr⁻¹. 370 t P·yr⁻¹ is disposed in non-sanitary landfills, while 3,300 t P·yr⁻¹ is disposed in sanitary landfills and represents a stock of the system.

Also in scenario 2, the total amount of material entering the biodegradable waste management system did not change in relation to the status quo, except in the case of the generated amount of sludge. Materials exiting the system represent air emissions of 3,700,000 t·yr⁻¹, material with market value 110,000 t·yr⁻¹, flow into soil and groundwater 4,000,000 t·yr⁻¹, forest residue 64,000 t·yr⁻¹, and material that is "recycled" within agriculture 21,000,000 t·yr⁻¹. The total increase in the system stock is 2,700,000 t·yr⁻¹. The

most significant flow of biodegradable waste in scenario 2 is agricultural residues. The amount of manure that can be adequately used as fertilizer has seemingly decreased, however if the use of digestate after AD is added to this amount then the total utilization of this flow is similar to scenario 1. The amount of unused potential of crop residues due to its utilization for energy is significantly decreased ($2,700, \text{t}\cdot\text{yr}^{-1}$) and now represents 10% of total agricultural residues or 30% of total crop residues. The second most important flow in the scenarios is sludge, the amount in this scenario is the same as in the previous one, but its use is not provided.

In terms of biological treatment, AD is predominantly used in this scenario for waste treatment due to the production of biogas used for energy production. This process treats $3,700,000 \text{ t}\cdot\text{yr}^{-1}$. Thermal treatment subsystem in this scenario is a key element in the utilization of waste in order to obtain energy. The total amount of material to be treated is about $5,300,000 \text{ t}\cdot\text{yr}^{-1}$. Thermal treatment is divided into two basic processes. The first is the combustion process that can be organized into mono-incinerators where only one type of waste is burned and this process is more dominant and it treats 85% of the material entering the subsystem. The second process is the incineration of mixed municipal waste in which the observed biodegradable waste is located. About 1 million $\text{t}\cdot\text{yr}^{-1}$ is treated in this way. If we compare with the status quo, the total amount of landfilled waste has increased ($3,000,000 \text{ t}\cdot\text{yr}^{-1}$). The increase is a consequence of the large amount of disposed ash $1,600,000 \text{ t}\cdot\text{yr}^{-1}$ and sludge $710,000 \text{ t}\cdot\text{yr}^{-1}$ which is not used in this scenario. The usage of ash and sludge as a raw material should be considered since it would reduce the load on landfills.

In Scenario 2 as well as in Scenario 1, the total amount of P entering the biodegradable waste management system did not change in relation to the status quo except in the case of the generated sludge ($2,300 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$). P output from the system through air emissions (gases and water vapor) $0.75 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$, material with market value $160 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$, flow into soil and groundwater $3,400 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$, forest residue $6.4 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$, and material that is "recycled" within agriculture $36,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. The total increase in the system stock is $3,300 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. P losses from the agricultural sector as a result of emissions from existing farms have been reduced to $3,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. In this scenario, the dominant process as biological treatment is AD, which recycles $3,100 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. In this process, it is an interesting fact that the recycling of P from this stream does not contribute to increasing the reuse of P in the system, because it would be recycled with the use of fertilizers. The AD process is significant due to the generation of biogas for energy production.

The largest amount of P enters in the thermal treatment process in this scenario. The total P treated is about $13,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. During the process of biomass incineration in order to obtain energy about $12,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$ ends up in the ash. The phosphorus contained in this flow represents more than 20% of the phosphorus in the entire biodegradable waste management system, so the options of using ash or extracting P

from it should be further considered. With process of biodegradable waste incineration in MSW, in ash ends $1,600 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. A total of $17,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$ is stock in the subsystem. The largest amount of P is found in the ash from the thermal treatment $13,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$ and the sludge $2,300 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$. Disposal in unsanitary landfills is estimated at $340 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$, which also represents the total emission from this subsystem. $16,000 \text{ t P}\cdot\text{yr}^{-1}$ is disposed in sanitary landfills.

The results for the indicators for the purpose of environmental protection show that in each selected indicator there has been an expected improvement compared to the current situation. If we compare scenarios 1 and 2, with the indicator of the amount of biodegradable waste entering the process of landfilling through flow sludge from wastewater treatment plants (Z1-2) as well as the indicator of the emission from landfills caused by unsanitary waste disposal (Z2) scenario 1 has less impact on the environment, and with the indicator of the amount of biodegradable waste that enters the landfilling process through the flow of biodegradable in MSW (Z1-1) values are approximate. For the indicator of emissions of materials from agriculture (Z3), scenario 2 shows a smaller impact on the environment.

The results of the same indicators at the phosphorus level show that in relation to the current situation in both scenarios the impact on the environment is smaller for all selected criteria, except for the indicator of biodegradable waste that enters the landfill process through flow sludge from wastewater treatment plant (Z1-2). At first glance, the results for the indicator in order to conserve resources, referring to the amount of stocks of material in landfills (R1), indicate that the situation in both scenarios is worse than in relation to the current situation. However, when we take into account that in future scenarios the construction of sanitary landfills is envisaged, which, unlike non-sanitary ones, create real stocks, i.e. do not cause emissions, the same cannot be concluded. As expected with the indicators of compost (R2 - 1) and sludge (R2 - 2) reused, scenario 1 shows the best results. While with the potential resource from ash indicator (R3), scenario 2 has the best results.

The results of the same indicators at the phosphorus level show an analogy between the relationship of the calculated indicators for all scenarios at the level of goods and the phosphorus level. This constancy leads to the conclusion that when biodegradable waste is managed in such a way as to use its potential as a resource, the implemented changes enable phosphorus to be managed as a resource.

The final result of this research is a defined model that combines material flow analysis and substance flow analysis in the biodegradable waste management system and enables the management of phosphorus as a resource through the development of alternative management scenarios. In all fields of waste management, decision making is a complex task, therefore this research aims to model the impact of the introduction of new biodegradable waste treatment technologies on the achievement of waste

management objectives and the transformation of phosphorus flows. The obtained results provide information that is useful for the future development of sustainable phosphorus management in Serbia, but also in other similar economies. Analyzing the potential of waste as a source of phosphorus, can influence the use and import of mineral fertilizers. Future analysis could show how much the use of mineral P fertilizers can be reduced.

KEY WORDS: Phosphorous; Material Flow Analysis; Biodegradable waste; Transition country

SPISAK TABELA

Tabela 3.1 Pregled korišćenih termina u MFA	32
Tabela 3.2 Morfološki sastav otpada u Srbiji	36
Tabela 3.3 Podaci o generisanju ostataka od uzgoja stoke.....	38
Tabela 3.4 Podaci o generisanju ostataka obrade poljoprivrednog zemljišta	39
Tabela 3.5 Lista postrojenja za tretman otpadnih voda.....	40
Tabela 3.6 Primenjeni transfer koeficijenti za biološke tretmane	44
Tabela 3.7 Primenjeni transfer koeficijenti za termičke tretmane	46
Tabela 3.8 Koncentracije fosfora u pojedinim tokovima biorazgradivog otpada	48
Tabela 3.9 Udeo biorazgradivog otpada u MSW u 2008. godini.....	52
Tabela 3.10 Sanitarne deponije u Srbiji.....	53
Tabela 3.11 Granične vrednosti za koncentracije teških metala u mulju za upotrebu u poljoprivredi	63
Tabela 3.12 Izabrani kriterijumi i indikatori za evaluaciju scenarija i povezani tokovi	65
Tabela 4.1 Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma i indikatora uz mere za postizanje postavljenih ciljeva - trenutno stanje	96
Tabela 4.2 Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma uz mere za postizanje postavljenih ciljeva - scenario 1	97
Tabela 4.3 Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma uz mere za postizanje postavljenih ciljeva - scenario 2	98

SPISAK SLIKA

Slika 3.1 Funkcionalni elementi sistema za upravljanje otpadom	33
Slika 3.2 Šematski prikaz sistema za upravljanje biorazgradivim otpadom	34
Slika 3.3 Proces biološkog tretmana.....	44
Slika 3.4 Proces termičkog tretmana.....	45
Slika 3.5 Proces deponovanje otpada	47

SPISAK GRAFIKA

Grafik 3.1 Upravljanje otpadnim vodama u Srbiji, podaci dati u $\text{Mt}\cdot\text{god}^{-1}$	42
Grafik 3.2 Procenat sakupljanja otpada	52
Grafik 3.3 Promene u upravljanju otpadnim vodama u Srbiji, podaci dati u $\text{Mt}\cdot\text{god}^{-1}$	55
Grafik 3.4 Promene u tokovima fosfora u upravljanju otpadnim vodama u Srbiji, podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	60
Grafik 4.1 MFA generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	67
Grafik 4.2 MFA podsistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.2); podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	68
Grafik 4.3 MFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	70
Grafik 4.4 SFA fosfora u Srbiji; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	72
Grafik 4.5 SFA fosfora sistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.4); podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	73
Grafik 4.6 Upravljanje otpadnim vodama u Srbiji – tokovi P; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	75
Grafik 4.7 SFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	76
Grafik 4.8 Nivoi izdvajanja P u različitim zemljama iz biorazgradivog otpada u MSW-u; podaci su dati u kg P po stanovniku po godini	78
Grafik 4.9 Nivoi izdvajanja P u različitim zemljama iz otpadnih voda; podaci su dati u kg P po stanovniku po godini	78
Grafik 4.10 Scenario 1 – MFA generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	80
Grafik 4.11 Scenario 1 – MFA podsistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.10); podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	81
Grafik 4.12 Scenario 1 – MFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	82
Grafik 4.13 Scenario 1 – MFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$	83
Grafik 4.14 Scenario 1 – SFA fosfora u Srbiji; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	84
Grafik 4.15 Scenario 1 – SFA fosfora sistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.14); podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	85
Grafik 4.16 Scenario 1 – SFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	86
Grafik 4.17 Scenario 1 – SFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{P}\cdot\text{god}^{-1}$	86

Grafik 4.18 Scenario 2 – MFA generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji; podaci dati u t·god ⁻¹	88
Grafik 4.19 Scenario 2 – MFA podsistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.18); podaci dati u t·god ⁻¹	89
Grafik 4.20 Scenario 2 – MFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u t·god ⁻¹	90
Grafik 4.21 Scenario 2 – MFA podsistema termičkog tretmana otpada; podaci dati u t·god ⁻¹	91
Grafik 4.22 Scenario 2 – MFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u t·god ⁻¹	91
Grafik 4.23 Scenario 2 – SFA fosfora u Srbiji; podaci dati u t P·god ⁻¹	92
Grafik 4.24 Scenario 2 – SFA fosfora sistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.23); podaci dati u t P·god ⁻¹	93
Grafik 4.25 Scenario 2 – SFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u t P·god ⁻¹	94
Grafik 4.26 Scenario 2 – SFA podsistema termičkog tretmana otpada; podaci dati u t P·god ⁻¹	95
Grafik 4.27 Scenario 2 – SFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u t P·god ⁻¹	95
Grafik 4.28 Poređenje rezultata indikatora za zaštitu životne sredine - tokovi biorazgradivog otpada.....	99
Grafik 4.29 Poređenje rezultata indikatora za zaštitu životne sredine – tokovi P	99
Grafik 4.30 Poređenje rezultata indikatora za očuvanje resursa - tokovi biorazgradivog otpada.....	100
Grafik 4.31 Poređenje rezultata indikatora za očuvanje resursa – tokovi P	101

SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

MFA (eng. Material Flow Analysis) – Analiza tokova materijala

SFA (eng. Substance Flow Analysis) – Analiza tokova supstanci

PTOV – Postrojenje za tretman otpadnih voda

AD – Anaerobna digestija

P – Fosfor

STAN (eng. subSTance flow ANalysis) – Softver za analizu tokova supstanci

MSW – Komunalni čvrsti otpad

MBT – Mehaničko biološki tretman

EU (eng. European Union) - Evropska unija

SADRŽAJ

Rezime	1
Extended abstract.....	2
Spisak tabela.....	13
Spisak slika	14
Spisak grafika	15
Spisak korišćenih skraćenica	17
1. UVODNA RAZMATRANJA.....	20
1.1 Predmet, problem i cilj istraživanja	21
1.2 Postavljene hipoteze i očekivani rezultati	22
1.3 Struktura disertacije.....	23
2. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA	25
2.1 Upravljanje otpadom.....	25
2.2 Upravljanje biorazgradivim otpadom.....	27
2.3 Analiza tokova materijala i upravljanje otpadom	28
2.4 Analiza tokova fosfora	30
3. MATERIJALI I METODE	32
3.1 Razvoj i definisanje modela	33
3.1.1 Definisanje sistema.....	33
3.1.2 Definisanje granice sistema i funkcionalna jedinica.....	34
3.1.3 Definisanje tokova materijala.....	35
3.1.4 Definisanje procesa u okviru sistema	43
3.1.5 Definisanje tokova fosfora.....	47
3.1.6 Nesigurnost podataka	48
3.1.7 Grafički prikaz modela	49
3.2 Razvoj ciljno orijentisanih scenarija upravljanja biorazgradivim otpadom.....	49
3.2.1 Okvir EU za unapređenje sistema upravljanja biorazgradivim otpadom.....	49
3.2.2 Nacionalni ciljevi upravljanja biorazgradivim otpadom	50
3.2.3 Unapređenje i promene u okviru sistema upravljanja otpadom	51
3.2.4 Definisanje scenarija.....	54

3.2.5 Scenario 1 - Upravljanje otpadom sa ciljem očuvanja resursa.....	56
3.2.6 Scenario 2 - Upravljanje otpadom sa ciljem iskorišćenja energije.....	57
3.2.7 Analiza tokova fosfora u alternativnim scenarijima.....	58
3.3 Postupak evaluacije i poređenja scenarija - kriterijumi za ocenu.....	61
4. REZULTATI I DISKUSIJA.....	66
4.1 Rezultati analize trenutnog stanja sistema upravljanja biorazgradivim otpadom	66
4.1.1 Trenutno stanje sistema – tokovi biorazgradivog otpada.....	66
4.1.2 Trenutno stanje sistema – tokovi fosfora.....	71
4.2 Prikaz rezultata razvijenih scenarija	79
4.2.1 Scenario 1 – tokovi biorazgradivog otpada	79
4.2.2 Scenario 1 – tokovi fosfora	83
4.2.3 Scenario 2 – tokovi biorazgradivog otpada	87
4.2.4 Scenario 2 – tokovi fosfora	92
4.3 Evaluacija i poređenje scenarija	96
5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	103
5.1 Zaključci	103
5.2 Mogućnosti implementacije rezultata i dalji pravci u istraživanju.....	104
6. LITERATURA	105
7. PRILOZI.....	116
Prilog 1. Model sistema upravljanja biorazgradivim otpadom – slike bez vrednosti	116
Prilog 2. Podaci o svim tokovima materijala iz STAN programa	120
Prilog 3. Objavljeni rezultati istraživanja	128

1. UVODNA RAZMATRANJA

Sistem upravljanja otpadom predstavlja važnu kariku između životne sredine i antroposfere. Njegova je funkcija barijera negativnog uticaja ljudske populacije tokom svih aktivnosti kojima se generiše otpad, a u cilju zaštite i očuvanja životne sredine i ljudskog zdravlja. U zemljama u razvoju i tranziciji, kao što je Srbija, postoje problemi u funkcionisanju ovog sistema, baze podataka su oskudne, nepotpune i nepouzdanе, a nedostaje i stručnog znanja i praktičnog iskustva (Vujic i dr., 2010, Ilić & Nikolić, 2016). Za razliku od razvijenih evropskih zemalja, u ovim zemljama takođe nije uspostavljen sistem odvojenog sakupljanja pojedinih kategorija otpada, ne postoje kapaciteti za tretman, a i deponije otpada u najvećem slučaju ne ispunjavaju standarde za sanitarno odlaganje uspostavljene evropskim propisima.

Ovakva praksa upravljanja otpadom dovodi do niza problema, od kojih je najznačajniji da se biorazgradivi otpad koji se sakuplja odlaže na deponije zajedno sa ostalim kategorijama otpada i bez prethodnog tretmana. Ovakvo postupanje sa otpadom nije u skladu sa evropskim propisima, gde se uvodi potpuna zabrana odlaganja netretiranog biorazgradivog otpada na deponije, a ni sa usvojenom uredbom o odlaganju otpada na deponije, gde su postavljeni rokovi za smanjenje odlaganja biorazgradivog otpada (Batinić 2015; SGRS 2010). Problem je još veći jer deponije na koje se odlaže najčešće nisu sanitarne, tj. nemaju projektovane mere koje bi smanjile negativni uticaj na životnu sredinu koji proizlazi od deponovanja ove kategorije otpada. Posebanu teškoću predstavlja otpad koji ne ulazi u sistem organizovanog sakupljanja otpada i za koji ne postoje podaci. Najčešće se ovaj otpad odlaže na divlja smetlišta.

Međutim, biorazgradivi otpad može da se posmatra i kao resurs ako uzmemo u obzir nutrijente koje sadrži. Ovakav pristup nije novina, jer je kompostiranje otpada najjednostavniji način tretmana koji se koristi kroz istoriju (Ashley i dr., 2011). Ovo je posebno značajno za fosfor, koji je neobnovljiv i čiji su resursi ograničeni. Za sve veće potrebe poljoprivredne proizvodnje koristi se fosfor poreklom iz zemljišta, koji se dopunjuje upotrebom đubriva. Iako se tradicionalno kao đubrivo koristi stajnjak, količine koje nastaju nisu dovoljne da se podmire potrebe današnje poljoprivredne proizvodnje. Zato se u tu svrhu proizvodi mineralno đubrivo, međutim problem današnjeg društva je da prilikom intenzivne poljoprivredne proizvodnje ne koristi efikasno fosfor (Ashley i dr., 2011).

Upravljanje fosforom kao resursom u okviru biorazgradivog otpada je kompleksan zadatak i potrebna je analiza svih relevantnih tokova i procesa u okviru sistema. Tek

nakon ove analize može se razmatrati kakav će uticaj imati implementirane promene u upravljanju otpadom na tokove fosfora.

Kombinacija analize tokova materijala MFA (eng. Material Flow Analysis) i analize tokova supstanci SFA (eng. Substance Flow Analysis) ima za cilj razvoj nove metode za dizajn i evaluaciju modela upravljanja biorazgradivog otpada u cilju održivog upravljanja fosforom. Analiza tokova materijala i supstanci podrazumeva sistematsku procenu tokova i zaliha materijala u okviru sistema koji je definisan u prostoru i vremenu. MFA se fokusira na ukupne tokove i zalihe, dok SFA analizira supstance. MFA i SFA su povezane činjenicom da se supstance koje se analiziraju pomoću SFA moraju nalaziti u materijalima koje analizira i MFA.

Osnova za razvoj metode je identifikacija i analiza trenutnog stanja u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom, čime se omogućava sagledavanje svih tokova u sistemu, relevantnih procesa u kojima se materija skladišti, transformiše ili transportuje, kao i mogućih izvora i finalnih odredišta izvan sistema. Sprovedenom analizom dobijaju se adekvatne informacije o značaju pojedinih tokova biorazgradivog otpada, podrazumevajući biorazgradivi komunalni otpad, poljoprivredni otpad, mulj iz postrojenja za preradu otpadnih voda i biorazgradivi industrijski otpad. Rezultati analize trenutnog stanja u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom i analize tokova fosfora poslužili su kao osnova za razvoj alternativnih scenarija i unapređenje sistema. Unapređenje sistema izvršeno je na osnovu razvijenih, ciljno orijentisanih scenarija, koji podrazumevaju implementaciju novih procesa za tretman i sakupljanje otpada.

1.1 PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja je identifikacija i analiza tokova biorazgradivog otpada i analiza tokova fosfora u okviru njih. Odlaganje biorazgradivog otpada u anaerobnim uslovima koji vladaju na deponijama može dovesti do mnogih problema u životnoj sredini zbog stvaranja deponijskog gasa, koji uključuju požare i eksplozije, neprijatne mirise, zagađenje vazduha i emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Tretman otpada pre odlaganja smatra se odgovarajućom strategijom za smanjenje rizika po životnu sredinu.

Transformacijom biorazgradivog otpada tokom različitih postupaka prilikom upravljanja dolazi i do transformacija tokova fosfora u okviru njih. Iz tog razloga je pored informacija o tokovima biorazgradivog otpada potrebno imati potpune informacije o tokovima fosfora pre i nakon tretmana.

Do sada nisu razvijeni alati kojima bi se omogućilo modelovanje i donošenje odluka prilikom upravljanja biorazgradivim tokovima otpada na takav način da se uključe i

tokovi fosfora. Primenom analize tokova materijala mogu se identifikovati svi tokovi biorazgradivog otpada, analizirati procesi koji dovode do njihovih transformacija i predvideti uticaji procesa koji bi bili implementirani u sistem u cilju smanjenja negativnog uticaja na životnu sredinu i ispunjenja ciljeva upravljanja otpadom (Brunner & Rechberger 2004, 2016). Sa istom metodologijom, primenjenom na nivo supstanci, moguće je identifikovati, modelirati i pratiti tokove fosfora u okviru prethodno analiziranih tokova (Stanisavljevic & Brunner, 2014). Na ovaj način dobija se osnova za unapređenje sistema upravljanja biorazgradivim otpadom kroz analizu trenutnog stanja i razvoj ciljno orijentisanog upravljanja biorazgradivim otpadom, kao i osnova za održivo upravljanje fosforom kao resursom.

Cilj istraživanja jeste razvoj modela koji će kombinovati analizu tokova materijala i analizu tokova supstanci za podršku razvoju upravljanja biorazgradivim otpadom i omogućiti upravljanje fosforom kao resursom kroz razvoj alternativnih sistema upravljanja. U svim oblastima upravljanja otpadom donošenje odluka je kompleksan zadatak, stoga ovo istraživanje ima kao specifičan cilj da modeluje uticaj uvođenja novih tehnologija u tretman biorazgradivog otpada, kako bi se dostigli ciljevi upravljanja otpadom i transformacije tokova fosfora.

1.2 POSTAVLJENE HIPOTEZE I OČEKIVANI REZULTATI

U ovoj doktorskoj disertaciji je na osnovu predmeta, problema i ciljeva istraživanja postavljeno pet hipoteza:

1. Analiza tokova materijala može se koristiti za modelovanje sistema za upravljanje biorazgradivim otpadom;
2. Analiza tokova supstanci može se koristiti za analizu tokova fosfora u okviru sistema za upravljanje biorazgradivim otpadom;
3. Promene sistema za upravljanje biorazgradivim otpadom direktno utiču na tokove fosfora u okviru i van analiziranog sistema;
4. Kombinacija MFA i SFA omogućava da se modeluje uticaj uvođenja novih tehnologija u tretman biorazgradivog otpada na tokove fosfora na sistemskom nivou;
5. Kombinacija MFA i SFA podržava razvoj upravljanja fosforom kao resursom.

Analizom dobijenih rezultata modelovanja sistema za upravljanje biorazgradivim otpadom i povezanih tokova fosfora stvoriće se uslovi za evaluiranje u kojoj meri upravljanje biorazgradivim otpadom utiče na transformaciju i upravljanje fosforom kao

resursom. Takođe moguće je predvideti uticaj predloženih modela upravljanja na dostizanje ciljeva upravljanja otpadom.

Kao specifični rezultati istraživanja očekuju se:

1. Definisani sistem za upravljanje biorazgradivim otpadom i fosforom primenjen na Republiku Srbiju, na osnovu kojeg će se moći identifikovati nedostaci koji zahtevaju unapređenje.
2. Definisani alternativni scenariji za upravljanje biorazgradivim tokovima otpada koji će omogućiti dostizanje postavljenih ciljeva upravljanja otpadom.
3. Izvršena MFA na nivou biorazgradivog otpada (dobara) i SFA analiza na nivou fosfora (supstanci) u okviru definisanog sistema i alternativnih scenarija.
4. Izbor, definisanje i primena kriterijuma za evaluaciju i poređenje definisanog sistema i alternativnih scenarija upravljanja biorazgradivim otpadom.
5. Razvijen model koji će kombinovati analizu tokova materijala i analizu tokova supstanci u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom, koji omogućava podršku razvoja sistema upravljanja fosforom kao resursom.

Dobijeni rezultati mogu predstavljati osnovu za razvoj strategija i implementaciju odgovarajućih tehnologija za upravljanje i tretman biorazgradivog otpada i mogu biti od izrazitog značaja za donosiocima odluka u upravljanju biorazgradivim otpadom sa aspekta resursno orijentisanog upravljanja fosforom, ekonomskih mogućnosti i ciljeva upravljanja otpadom. Razvijeni model moći će se koristiti za modelovanje drugih sistema upravljanja biorazgradivim otpadom i kao podrška prilikom donošenja odluka kada je u pitanju budući razvoj sistema upravljanja ovim tokovima otpada, na nivou gradova, regiona ili država.

1.3 STRUKTURA DISERTACIJE

Doktorska disertacija je organizovana u sedam poglavlja.

U okviru prvog poglavlja data su uvodna razmatranja u oblasti istraživanja, analizirani su predmet, problem i ciljevi istraživanja i definisane hipoteze i očekivani rezultati sprovedenog istraživanja.

U okviru drugog poglavlja prikazan je pregled stanja u oblasti istraživanja. Analizirano je stanje u upravljanju otpadom, posebno upravljanje biorazgradivim otpadom. Prikazan je pregled stanja u oblasti analize tokova materijala u okviru

problematike upravljanja otpadom i analize tokova supstanci u okviru problematike upravljanja fosforom.

U trećem poglavlju predstavljen je materijal i definisana metoda korišćena prilikom istraživanja u okviru doktorske disertacije. Prikazan je razvoj modela kroz definisanje sistema, tokova materijala i relevantnih procesa. Prikazana je analiza tokova fosfora i ocenjena nesigurnost korišćenih podataka. Zatim su analizirane mogućnosti unapređenja prikazanog sistema kroz razvoj alternativnih scenarija, njihovu evaluaciju i poređenje.

U četvrtom poglavlju izneti su rezultati istraživanja i sprovedena diskusija povodom dobijenih rezultata. Na osnovu sprovedenog istraživanja predstavljeni su rezultati modelovanja sistema upravljanja tokovima biorazgradivog otpada i rezultati modelovanja alternativnih scenarija. Rezultati su prikazani na nivou tokova biorazgradivog otpada i na nivou tokova fosfora. Analiziran je sistem upravljanja biorazgradivim otpadom u Srbiji i njegov uticaj na tokove fosfora. Analizira se i diskutuje doprinos analize tokova fosfora razvoju ciljno orijentisanog upravljanja biorazgradivim otpadom.

Peto poglavlje sadrži zaključna razmatranja koja proizlaze iz rezultata istraživanja i diskusije u okviru doktorske disertacije, kao i predlog mogućnosti implementacije rezultata sa istaknutim daljim pravcima u istraživanju.

U šestom poglavlju dat je spisak korišćene stručne i naučne literature.

U sedmom poglavlju se nalaze prilozi.

2. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

2.1 UPRAVLJANJE OTPADOM

Otpad je nezaobilazan deo svakodnevnog života (Hering, 2012). Kontinuirani razvoj globalne ekonomije i poboljšanje životnog standarda ima za posledicu proizvodnju velike količine otpada. U svetu je generisanje otpada u porastu. Procenjuje se da se svake godine generiše oko 2,01 milijarda tona otpada. Sa ubrzanom urbanizacijom, industrijalizacijom i porastom populacije očekuje se da se do 2050. godine količina generisanog otpada uveća za 70% (Kaza i dr., 2018). Otpad može u svim fazama životnog ciklusa negativno uticati na ljudsko zdravlje i životnu sredinu ako se njime ne upravlja na odgovarajući način (Funari i dr., 2016; Vergara & Tchobanoglous, 2012). Upravljanje otpadom je važno pitanje životne sredine, posebno u zemljama u razvoju. Zemlje u razvoju učestvuju sa 56% u ukupnoj količini generisanog čvrstog otpada u svetu (Alam & Qiao, 2020).

Održivo upravljanje otpadom postaje neophodno u svim fazama upravljanja. Da bi se to postiglo, svi tehničke i netehničke aspekte sistema upravljanja otpadom trebalo bi analizirati u celini, pošto su oni međusobno povezani i razvoj u jednoj oblasti često utiče na prakse ili aktivnosti u drugoj oblasti (Pires i dr., 2011). Otpadom se mora prvenstveno upravljati kako bi se osigurala zaštita ljudskog zdravlja i životne sredine (Brunner & Baccini, 1992). Takođe, sistemi za tretman otpada moraju biti kompatibilni sa okolinom. Glavni cilj je da ne postoje dugoročni rizici nastali sadašnjim upravljanjem otpadom, kako se ne bi ostavio problem budućim generacijama. Otpad treba tretirati kako bi postao inertan pre njegovog odlaganja. Takođe, potrebno je ispuniti sledeće ciljeve (Stanisavljevic & Brunner, 2019):

1. Sistemi za tretman otpada kao proizvod treba da imaju samo dva toka: materijale za konačno odlaganje i (ili) materijale koji imaju kvalitet i tržište za reciklažu.
2. Tokom tretmana otpada, opasni materijali moraju biti koncentrisani, a neopasani materijali ne smeju se mešati sa opasnim materijalima.
3. Organski materijali ne bi trebalo da se odlažu na deponije.
4. Potrebno je da deponije budu konstruisane kao monodeponije sa samo jednom vrstom materijala u jednoj ćeliji, što daje mogućnost ponovne upotrebe deponovanog materijala.

U ekonomski i tehnološki razvijenim zemljama, velikom količinom proizvedenog otpada se bezbedno rukuje i na kraju se on odlaže. Imaju dobro uspostavljene tehnologije za tretman otpada, kao što su kompostiranje, anaerobna digestija, insineracija, piroliza, gasifikacija i reciklaža i dr., dok se ostaci odlažu na moderne sanitarne deponije (Challcharoenwattana & Pharino, 2015).

U poređenju sa razvijenim zemljama, zemlje u razvoju snažnije su pod uticajem neodrživog upravljanja otpadom. U zemljama sa niskim prihodima preko 90% otpada se često odlaže na neuređene deponije, a sam tretman, ako postoji, delimično je nekontrolisan (Alam & Qiao, 2020). Ovakva praksa stvara ozbiljne posledice po zdravlje, bezbednost i životnu sredinu. Pravilno upravljanje otpadom od suštinskog je značaja za izgradnju održivih gradova, ali to i dalje predstavlja izazov mnogim zemljama i gradovima u razvoju.

Na regionalnom nivou, neadekvatno upravljanje otpadom uzrokuje štetne uticaje na ekosistem, kao i na zdravlje ljudi. Otvoreno spaljivanje ili nepravilno odlaganje otpada dovodi do zagađenja vazduha emisijom štetnih gasova, toksina, policikličnih aromatičnih ugljovodonika, dioksina, furana, isparljivih organskih jedinjenja, čestičnih materija itd., kao i zagađenja zemlje i vode procednim vodama. Na globalnom nivou upravljanje čvrstim otpadom utiče na klimatske promene, zagađenje okeana i iscrpljivanje resursa. Udeo upravljanja otpadom u globalnim antropogenim emisijama gasova sa efektom staklene bašte iznosi oko 3–5% (Iqbal i dr., 2020). Direktnoj emisiji gasova uglavnom doprinose emisije metana iz degradacije organskog otpada na deponijama i emisije ugljen-dioksida od sagorevanja otpada, dok se indirektna emisija i iscrpljivanje resursa pripisuju potrošnji energije koja se temelji na fosilnim gorivima i neefikasnom recikliranju materijala (Iqbal i dr., 2020).

Srbija se, kao predstavnik zemalja u razvoju i tranziciji i kao kandidat za ulazak u Evropsku uniju (EU), suočava s nizom izazova u upravljanju otpadom i otpadnim vodama (Stanisavljević i dr., 2011; Vujic i dr. 2017; Stošić i dr. 2016). Osnovna infrastruktura za upravljanje otpadom je još uvijek u fazi razvoja, a samo 20% nastalog čvrstog komunalnog otpada odlaže se na sanitarne deponije (AZŽS, 2019). Velika većina se deponuje bez odgovarajućeg tretmana. Ova vrsta prakse, međutim, ima nekoliko negativnih uticaja na životnu sredinu i efikasnu upotrebu resursa (Al-Khatib i dr., 2010). Većina generisanog i prikupljenog biorazgradivog otpada obično završi zajedno sa ostalim frakcijama čvrstog otpada odloženim na neodgovarajućim deponijama (kontrolisanim i nekontrolisanim odlagalištima), koje nisu izgrađene u skladu s propisima EU (Stanisavljevic i dr., 2015; Mikic i Naunovic, 2013).

2.2 UPRAVLJANJE BIORAZGRADIVIM OTPADOM

Biorazgradivi otpad uključuje svaku organsku materiju u otpadu koja se razlaže na ugljen-dioksid, vodu, metan ili jednostavne organske molekule posredstvom mikroorganizma i drugih živa bića tokom kompostiranja, aerobne razgradnje, anaerobne digestije ili sličnih procesa (Katinas i dr., 2019).

Sistem upravljanja biorazgradivim otpadom podrazumeva upravljanje sledećim kategorijama otpada: komunalnim biorazgradivim otpadom, poljoprivrednom i šumskom otpadnom biomasom, muljem nastalim tretmanom otpadnih voda, industrijskim biorazgradivim otpadom (poreklom iz drvne industrije, prehrambene itd.).

Zemlje sa visokim dohotkom uglavnom generišu čvrsti otpad sa većim udelom papira, plastike i drugih neorganskih materijala, dok zemlje sa nižim i srednjim prihodima imaju veći udeo biorazgradivog otpada (Das i dr., 2019; Iqbal i dr., 2020). Biorazgradivi otpad, koji se najvećim delom sastoji od otpada od hrane, predstavlja 40–70% komunalnog čvrstog otpada u zemljama u razvoju (Wei i dr., 2017). Stoga je za uspostavljanje održivog sistema upravljanja otpadom od suštinskog značaja odvajanje i recikliranje biorazgradivog organskog materijala iz toka komunalnog otpada.

Prethodna istraživanja pokazuju da u Srbiji godišnja generisana količina biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu iznosi oko milion tona. Takođe, procenjuje se da u organizovanom sistemu upravljanja otpadom završi oko 350.000 tona generisanog poljoprivrednog otpada, dok se ukupne količine generisane poljoprivredne otpadne biomase procenjuju na oko 13 miliona tona godišnje (ostaci poljoprivrednih i ratarskih kultura, stajnjak i dr.) (SGRS, 2010). Biorazgradivi mulj nastaje u postrojenjima za tretman otpadnih voda i sa njime je potrebno odgovarajuće postupati (stabilizacija, deponovanje). Trenutno na teritoriji Srbije ne postoji dovoljan broj postrojenja za tretman otpadnih voda, pa i količina ove vrste tretiranog otpada je mala. Međutim, u budućnosti se očekuje povećanje broja ovih postrojenja, pa se i tok mulja kao otpada treba uzeti u obzir. Industrijski biorazgradivi otpad generiše se najvećim delom u prehrambenoj i drvnoj industriji. Prema statistici otpada, godišnje nastane više od 300.000 tona industrijskog otpada biljnog i životinjskog porekla, a 37.071 tona otpada nastane od prerade drveta.

U Srbiji tokovi biorazgradivog otpada su značajni, posebno poreklom iz poljoprivrednog sektora, međutim infrastruktura za upravljanje ovom vrstom otpada ne postoji ili je na vrlo niskom nivou (Stanisavljevic i dr., 2015). Iako je u toku zvanični proces ispunjavanja ciljeva EU za upravljanje otpadom koji se odnosi na reciklažu, povrat materijala, preusmeravanja biorazgradivog otpada sa deponija itd., poljoprivredna biomasa je prepoznata samo kao potencijalni alternativni izvor energije u okviru

Strategije energetskog razvoja Srbije do 2025. godine (SGRS, 2015). Ostalim tokovima otpada posvećuje se daleko manje pažnje.

Trenutno u Srbiji ne postoje tretmani biorazgradivog otpada koji tretiraju značajnije količine ovih tokova otpada, za razliku od prakse u zemljama Evropske unije. Nedostatak tretmana ima za posledicu da biorazgradivi otpad najčešće završi pomešan sa ostalim frakcijama otpada na deponijama koje ne ispunjavaju uslove sanitarnog deponovanja. Problemi sa aspekta zaštite životne sredine, koji nastaju prilikom nesanitarnog deponovanja mešanog otpada, povezani su sa produkcijom deponijskog gasa sa visokim sadržajem metana koji se nesmetano emituje u atmosferu, kao i produkcijom procednih voda visoko opterećenih teškim metalima i organskim sadržajem, što se emituje u hidrosferu. U trenutnoj praksi upravljanja biorazgradivim otpadom evidentan je nedostatak modela upravljanja ovim tokovima otpada, kroz procese tretmana, transporta i odlaganja, kao i modela podrške prilikom donošenja odluka, kojima se mogu predvideti dugoročne posledice uvedenih reformi i unapređenja sistema.

Kao zemlja kandidat za članstvo u Evropskoj uniji, Srbija ima obavezu da ispuni zahteve postavljene EU direktivama. Relevantne direktive za upravljanje biorazgradivim otpadom su:

1. Direktiva o deponijama (1999/31/EC), kojom se postavljaju ciljevi smanjenja deponovanja biorazgradivog otpada na deponijama. Kako bi Srbija ispunila ove ciljeve, količina biorazgradivog otpada koja se odlaže na deponijama mora biti smanjena na 75%, 50%, 35% u odnosu na količine generisane u 2008. godini do 2022, 2026, i 2030. godine (Stanisavljevic i dr., 2018).
2. Okvirna direktiva o otpadu (2008/98/EC), kojom se postavljaju minimalni ciljevi za ponovnu upotrebu i reciklažu reciklabilnih materijala.
3. Direktiva o tretmanu urbanih otpadnih voda (91/271/EEC). Njom se zahteva sakupljanje i sekundarni tretman otpadne vode za aglomeracije >2000 ekvivalent stanovnika i naprednije tretmane za aglomeracije >10 000 ekvivalent stanovnika. Takođe, direktiva zahteva monitoring prečišćavanja otpadnih voda i kontrolu odlaganja i ponovnog korišćenja mulja.
4. Direktiva o kanalizacionom mulju (86/278/EEC) reguliše upotrebu mulja nakon tretmana otpadnih voda u poljoprivredi.

2.3 ANALIZA TOKOVA MATERIJALA I UPRAVLJANJE OTPADOM

Analiza materijalnog toka (MFA) široko je primenjivana metoda, koja pruža sistemski pregled međusobno povezanih procesa i tokova u cilju održavanja donošenja

strateških i prioriternih odluka i dizajniranja mera prilikom upravljanja. MFA se koristi za identifikaciju svih tokova i zaliha određenih materijala i supstanci u okviru antropogenih sistema. Pruža sveobuhvatan pregled materijalnog sistema i njegove interakcije sa okolinom. Od velike je važnosti za povezivanje antroposfere sa okolinom. Stoga služi za rano prepoznavanje, postavljanje prioriteta, za analizu i poboljšanje efikasnosti mera i za kreiranje efikasnih strategija upravljanja materijalima u pogledu održivosti (Brunner i Baccini, 1992; Brunner & Rechberger, 2004, 2016).

MFA se sprovodi na više nivoa. Može se primeniti bilo gde u upravljanju otpadom za bilo koji definisani prostor i vremensku granicu, od malog postrojenja za preradu u toku jednog dana do cele države u toku godinu dana (Tang & Brunner, 2013).

MFA se često koristi za analizu i unapređenje sistema upravljanja otpadom i pojedinim njegovim tokovima, analizu implementacije mogućih scenarija, kao i procenu mogućih posledica ovakvih promena. Zbog zakona očuvanja mase, rezultati MFA mogu se kontrolisati jednostavnim materijalnim bilansom koji upoređuje sve ulaze, zalihe i izlaze iz procesa (Stanisavljevic & Brunner, 2014). Upravo ova specifična karakteristika MFA čini metodu atraktivnom kao sredstvo za podršku pri odlučivanju.

Na značaj sveobuhvatnog i sistemskog pristupa primenom analize tokova materijala u sistemima upravljanja otpadom, u svom istraživanju ukazuju Döberl i dr. 2002, Brunner & Fellner 2007, Stanisavljevic & Brunner 2019. Ova metodologija je korišćena u cilju dizajniranja održivih sistema upravljanja otpadom i u cilju podrške pri donošenju odluka. MFA je neprocenjiv alat koji razvijene zemlje koriste za upravljanje kompleksnim tokovima otpada (Kiddee i dr., 2013; Islam & Huda, 2019).

Mastellone i dr. 2009, Gurauskiene & Stasiskiene 2011, Stanic-Maruna & Fellner 2012, Masood i dr. 2014, Allesch & Brunner 2017. takođe su istraživali problematiku analize tokova materijala u sistemu upravljanja otpadom. U okviru doktorske disertacije Stanisavljević 2013, a kasnije u okviru rada Stanisavljevic & Brunner 2014, rađeno je istraživanje sa naglaskom značaja kombinacije analize tokova materijala i analize tokova supstanci na sisteme upravljanja otpadom. U ovom istraživanju naglašena je potreba analize pojedinih supstanci u ukupnim tokovima otpada, uzimajući u obzir da sistemi za upravljanje otpadom predstavljaju filter između antroposfere i životne sredine, pri čemu se otpad transformiše u određene materijale i emisije. Slična tematika kombinacije MFA i SFA bila je predmet istraživanja objavljenih i u radovima Arena & Di Gregorio, 2014; Zhang i dr., 2008; Allesch & Brunner, 2017.

2.4 ANALIZA TOKOVA FOSFORA

Fosfor čini sastavni deo biorazgradivog otpada, kao jedan od najvažnijih nutrijenata (pored azota, natrijuma i kalijuma) potrebnih biljkama (koncentracija u većini biljaka kreće od 0,1 % do 0,4 %), kao energetska zaliha i izvor u formi ADP (adenozin difosfata) i ATP (adenozin trifosfata), i kao sastavni deo proteina, enzima i fosfolipida. U povećanim koncentracijama fosfor može da zagađuje površinske vode izazivajući eutrofikaciju.

Takođe, treba naglasiti da je fosfor neobnovljiv, esencijalni resurs za koji ne postoji zamena (Ashley i dr., 2011; Cordell i dr., 2012; Scholz i dr., 2013). Fosfor nastaje razučivanjem i raspadom stena i minerala sa niskom rastvorljivošću. U poljoprivredi, fosfor u žetvenim proizvodima potiče iz zemljišta koji se nadopunjuje primenom mineralnih đubriva. Trenutno najekonomičniji način dobijanja fosfora jeste ekstrakcija iz fosfatnih stena. Do 90% ukupne količine fosfata u svetu koristi se u vidu mineralnih đubriva (Adegbeye i dr. 2020; Sabiha-Javied i dr. 2009). Ostatak se upotrebljava za proizvodnju deterdženata, kao hrana za životinje i ima posebnu primenu za aditive, tretmane metala i dr. Kontinuirana primena mineralnog fosfatnog đubriva je neophodna da bi savremena poljoprivreda opstala. Dostupnost relativno jeftinih neorganskih đubriva, kao što su fosfati (PO_4^{3-}) dobijeni iz fosfatnih stena (Cordell i dr., 2009), smanjila je potrebu za reciklažom esencijalnih biljnih nutrijenata sadržanih u otpadu (van der Wiel i dr., 2020).

Zabrinutost zbog ograničenih resursa fosfora i očekivane buduće oskudice snabdevanja hranom globalne populacije ukazao je još 1798. godine Tomas Maltus (Ashley i dr., 2011). Kasnije, 1972. godine, Donella Meadows i koautori knjige „Granice rasta“ (Limits to Growth) sugerišu da su određeni elementi ograničeni i da se jednog dana mogu istrošiti (Meadows i dr., 1972). Trenutno je globalna poljoprivreda u velikoj meri zavisna od unosa neorganskih đubriva (Cordell i dr., 2009). Međutim, buduća dostupnost neorganskih đubriva, posebno P, upitna je jer su fosfatne stene ograničeni resurs (Cordell i dr., 2012). Takođe raspodela nalazišta vezuje se za mali broj zemalja, a Maroko i Kina kontrolišu više od polovine trenutno poznatih rezervi, što predstavlja geopolitički rizik za globalnu dostupnost P (Cordell and White, 2015).

Nemački hemičar i lekar Theodor Weyl objavio je još 1894. godine prva istraživanja koja su uključivala i analizu tokova fosfora, u publikaciji „Esej o metabolizmu Berlina“ (Essay on the metabolism of Berlin), i koja su imala za cilj kvantifikovanje potrošnje vode, hrane i nutritivnih materija u Berlinu (Lederer & Kral, 2015).

Danas istraživanja koja uključuju fosfor mnogo su češća jer je uočeno da, iako neobnovljiv, njegov ciklus nije kružan, odnosno njegova upotreba nije efikasna. Baccini &

Brunner 2012. u svom istraživanju prikazanom u knjizi „Metabolizam antroposfere“ (*Metabolism of the Anthroposphere*) pokazuju da su gubici fosfora tokom proizvodnje hrane veliki i da se čak 75% neiskorišćenog fosfora akumulira u zemljištu. Dodatnom gubitku u ciklusu fosfora doprinosi velika količina deponovanog biorazgradivog otpada na deponijama.

Analiza svih tokova i transformacija fosfora može omogućiti optimalno upravljanje njim kao resursom. Prvo ovakvo istraživanje bilo je deo projekta 1998. godine pod nazivom „Informacije o količinama materijala kao sredstvo za donošenje odluka u politici zaštite životne sredine“ (*Materials Accounting as a Tool for Decision Making in Environmental Policy*) (Brunner i dr., 1998). Istraživanje koje je imalo za cilj isključivo analizu tokova fosfora izvršeno je u okviru doktorske disertacije Seyhan 2006. godine, gde se analiziraju i porede tokovi fosfora u Austriji i Turskoj. Nakon toga usledila su novija istraživanja, koja koriste analizu tokova fosfora na nivou regiona i država. Istraživanje za Austriju unapređeno je i kroz rad „Austrijski budžet fosfora kao osnova za optimizaciju resursa“ (*The Austrian P budget as a basis for resource optimization*) (Egle i dr., 2014; Zoboli, 2016).

Istraživanja o tokovima fosfora obavljena su u Japanu (Matsubae-Yokoyama i dr., 2009), u Evropi (Ott & Rechberger, 2012), u Francuskoj (Senthilkumar i dr., 2012), na Novom Zelandu (Li i dr., 2015), u Danskoj (Klinglmair i dr., 2015), u Australiji (Cordell i dr., 2013; Biswas Chowdhury i dr., 2018), i u Kini (Chen i dr., 2008; Ma i dr., 2012; Li i dr., 2020). Trenutno, međutim, postoji samo nekoliko studija u kojima se analiziraju tokovi fosfora u zemljama u tranziciji i u razvoju (Lederer i dr., 2015). Nedostaju potrebne informacije za razumevanje tokova fosfora i njihovih posledica u ovim zemljama.

Sprovedenom analizom tokova fosfora dobijaju se informacije o mogućim alternativnim izvorima i finalnim odredištima fosfora (Moriguchi & Hashimoto, 2016; Drangert, J.O., 2012). Kao potencijalni izvori fosfora izdvajaju se kanalizacioni mulj, koji se obično koristi direktnom aplikacijom na poljoprivredno zemljište (Lederer i Rechberger, 2010). Sa druge strane, zalihe fosfora se nalaze u ostacima nakon spaljivanja čvrstog otpada (Kalmykova i dr., 2012) i samim tim fokusiranje na otpadne vode kao jedini izvor obnovljenog fosfora nije dovoljno. Takođe, analizirana je dostupnost neiskorišćenih resursa fosfora u Japanu i utvrđeno je da je količina fosfora u šljaci iz proizvodnje gvožđa i čelika skoro jednaka količini u uveznoj fosfatnoj rudi, i u količini i u koncentraciji (Matsubae-Ikoiama i dr., 2009; Yamasue i dr., 2013).

3. MATERIJALI I METODE

Analiza tokova materijala i supstanci je inženjerski alat koji je u širokoj upotrebi u dizajniranju i upravljanju. Za potrebe analize tokova materijala i supstanci potrebno je prvo definisati sistem u prostoru i vremenu, dok se procesi, tokovi i zalihe definišu u okviru zadatih granica (Brunner and Rechberger, 2004, 2016). Fokus analize tokova materijala jesu ukupni tokovi i zalihe, dok se analizom tokova supstanci posmatraju supstance koje su sastavljene od uniformnih entiteta i definisane su kao hemijski elementi i jedinjenja.

Za potrebe modelovanja sistema primenjena je analiza tokova materijala (MFA) i analiza tokova supstanci (SFA). Primenom kombinacije MFA i SFA razvijen je model za identifikaciju, procenu i analizu tokova biorazgradivog otpada i fosfora. MFA i SFA su povezane činjenicom da supstance koje analizira SFA moraju biti sadržane u materijalima koje analizira MFA (Stanisavljevic i Brunner, 2014). Analiza se vrši sa stanovišta nutrijenata (kao resursa i kao zagađivača), što bi trebalo da olakša donošenje odluka vezanih za efikasno upravljanje fosforom, pogotovo u zemljama kandidatima za članstvo u EU.

Glavni termini definisani u okviru MFA i korišćeni u ovoj disertaciji opisani su u tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Pregled korišćenih termina u MFA (Brunner & Rechberger, 2004, 2016)

Termin	Opis
Supstance	Hemijski elementi ili jedinjenja sastavljena od uniformnih jedinica (atomi, molekuli). Od njih se sastoje razna dobra (proizvodi). Njihova glavna osobina je da su identične konstitucije i da su homogene.
Dobra	Ekonomski entiteti pozitivne ili negativne ekonomske vrednosti koju im je odredilo tržište, sastoje se od nekoliko supstanci.
Materijali	Termin se odnosi i na supstance i na dobra.
Procesi	Definisani su kao transport, transformacija ili skladištenje materijala.
Tokovi	Definišu se kao količina materijala koja protiče u određenom vremenskom periodu kroz posmatrani proces ili sistem. Iskazuje se kao masa/vreme.
Transfer koeficijenti	Definišu se kao particionisanje materijala tokom određenog procesa.
Sistem	Predstavlja objekat istraživanja. Povezuje procese i tokove materijala unutar granica sistema definisanih u prostoru i vremenu.

3.1 RAZVOJ I DEFINISANJE MODELA

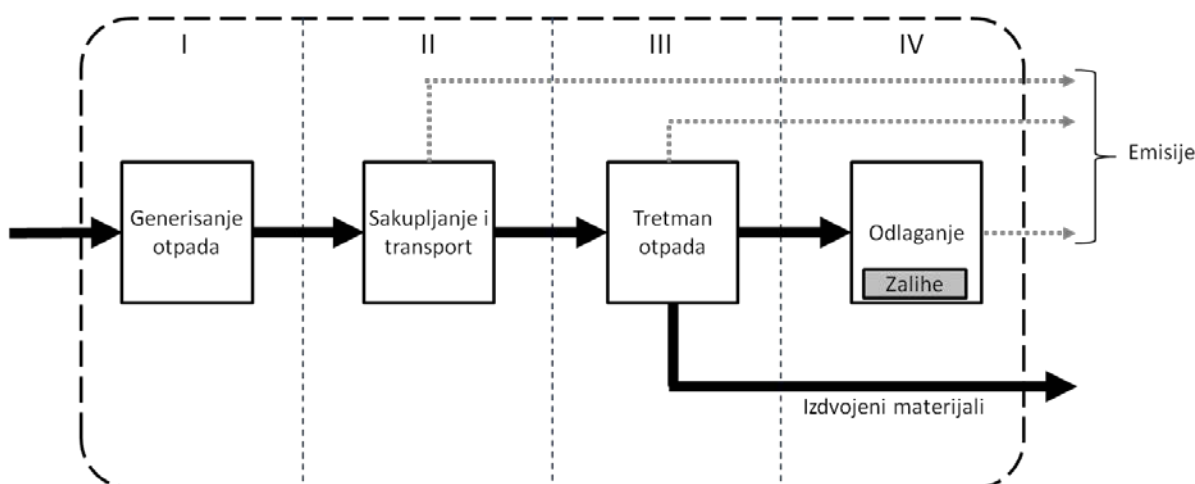
Pristup razvoja modela zasnovan je na činjenici da je za razumevanje i identifikaciju tokova fosfora neophodno prvenstveno izvršiti identifikaciju, analizu i maseni bilans tokova biorazgradivog otpada.

Sprovedeni postupak za razvoj modela je izveden primenom sledećih koraka:

1. Definisanje sistema
2. Definisanje granica sistema i funkcionalna jedinica
3. Definisanje tokova materijala
4. Definisanje procesa u okviru sistema
5. Definisanje tokova fosfora
6. Analiza nesigurnosti podataka
7. Grafički prikaz modela.

3.1.1 Definisanje sistema

Predmet ovog istraživanja jeste upravljanje otpadom, u kome se analiziraju biorazgradivi tokovi otpada. Generalno, sistem upravljanja otpadom sastoji se iz četiri funkcionalna elementa, prikazana na slici 3.1.

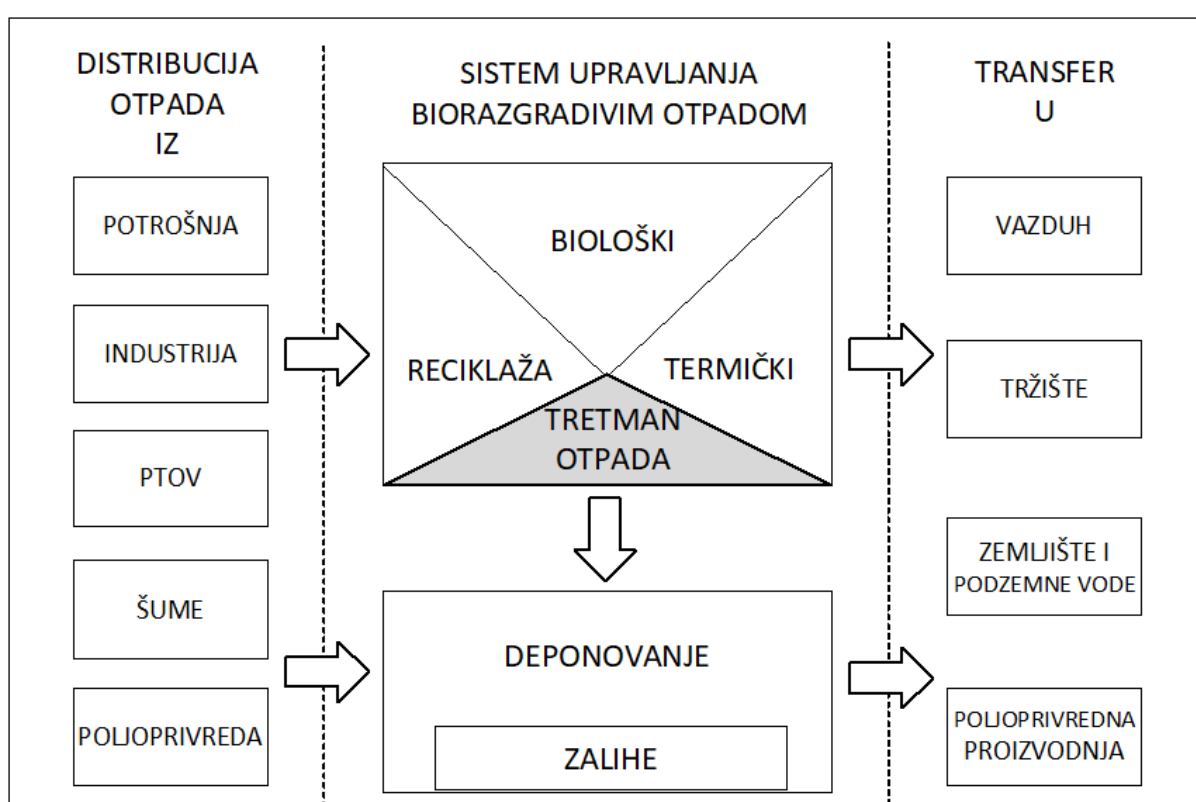


Slika 3.1 Funkcionalni elementi sistema za upravljanje otpadom (Stanisavljević, 2013)

Svi tokovi biorazgradivog otpada prolaze kroz procese generisanja, sakupljanja, transformacije i odlaganja, koji su već uspostavljeni u okviru postojećeg sistema upravljanja otpadom, što znači da predstavljaju njegov deo.

U ovoj doktorskoj disertaciji sprovedena analiza ne analizira segment sakupljanje i transport otpada zbog poteškoće da se posebno analizira sakupljanje biorazgradivog otpada odvojeno od ostalih tokova otpada.

Biorazgradivi otpad se generiše u okviru svakog segmenta antropogenog sistema. Najznačajniji tokovi potiču iz sektora potrošnje, industrije, poljoprivrede, tretmana otpadnih voda, šumarstva. Sistem za upravljanje biorazgradivim otpadom utiče na sisteme sa kojima je povezan. Uticaj se ogleda u vidu transfera emisije u životnu sredinu, ali i transfera resursa u poljoprivredu i industriju. Šematski prikaz definisanog sistema dat je na slici 3.2.



Slika 3.2 Šematski prikaz sistema za upravljanje biorazgradivim otpadom (Vujović i dr., 2020)

3.1.2 Definisane granice sistema i funkcionalna jedinica

Prilikom definisanja sistema, pored izbora predmeta analize (funkcionalne jedinice) veoma važnu ulogu ima pravilan izbor granice sistema. Granice sistema se definišu u prostoru i vremenu.

Prostorna granica

Analiza je izvršena za Republiku Srbiju. Srbija je zemlja u tranziciji sa 7,19 miliona stanovnika, okružena kopnom. Više od 40% stanovnika živi u ruralnim naseljima, što predstavlja 96% ukupnog broja naselja u Srbiji (RZS 2011). Zauzima površinu od 88.499 kvadratnih kilometara, s tim da je najveći deo njene teritorije na Balkanskom poluostrvu i manji deo u Panonskoj kotlini. Od ukupne teritorije, 65% je poljoprivredno zemljište, dok kod ostalog dominiraju šume (SGRS 2014). Za potrebe ovog istraživanja, prostorna granica je definisana kao administrativna granica Republike Srbije.

Vremenska granica

Vremenska granica od jedne godine je primenjena za maseni balans. Analiza se odnosi na 2015. godinu. Međutim, usled ograničene dostupnosti podataka, prikupljeni su podaci iz različitih godina, u periodu od 2013. do 2018. godine. Ovo je opravdano činjenicom da se u tom periodu nije došlo do značajnih promena u okviru upravljanja biorazgradivim otpadom.

Funkcionalna jedinica

Funkcionalna jedinica sistema predstavlja ukupnu količinu generisanog biorazgradivog otpada, koji podrazumeva sledeće tokove:

1. biorazgradivi otpad iz čvrstog komunalnog otpada,
2. biorazgradivi industrijski otpad (prerada drveta, otpad iz prehrambene industrije, biorazgradiva frakcija ambalažnog otpada),
3. mulj iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda,
4. neiskorišteni šumski ostaci i
5. poljoprivredni ostaci (uzgoj životinja i ratarska proizvodnja).

U analizu nisu uzete u obzir ostale nebiorazgradive kategorije komunalnog i industrijskog otpada (poput plastike, stakla, metala, pepela i drugih frakcija otpada koje nisu biorazgradive).

3.1.3 Definisane tokove materijala

Biorazgradivi otpad u čvrstom komunalnom otpadu

Komunalni čvrsti otpad (MSW) predstavlja otpad iz domaćinstava, kao i drugi otpad koji je zbog svoje prirode ili sastava sličan otpadu iz domaćinstva. Biorazgradivi otpad u čvrstom komunalnom otpadu uključuje ukupni biorazgradivi otpad koji nastaje u domaćinstvima i sličan otpad.

Podaci o količini i sastavu komunalnog otpada, a samim tim i sadržaju biorazgradivog otpada, izvedeni su iz različitih istraživanja. Konkretno, korišćena je studija o morfološkom sastavu i količini komunalnog otpada koju je izvršio Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu 2009. godine (Vujic i dr., 2010) i novija analiza IMG (2015) za opštine u Srbiji. Prema drugoj studiji, u Srbiji se godišnje generiše 2,4 miliona tona čvrstog komunalnog otpada. Oko 50% komunalnog otpada čini baštenski zeleni otpad zajedno sa drugim biorazgradivim otpadom (kuhinjski otpad), a ako se uključi papir i karton, ukupna količina biorazgradivog otpada iznosi 60% (tabela 3.2).

Tabela 3.2 Morfološki sastav otpada u Srbiji (IMG 2015)

Kategorija otpada	Procentualni deo
Baštenski otpad	18,14%
Ostali biorazgradivi otpad	31,40%
Papir	5,36%
Karton	5,33%
Staklo	3,53%
Kompozitni materijali	1,05%
Metal-ambalažni i dr.	0,69%
Aluminijumske konzerve	0,40%
Plastični ambalažni	4,47%
Plastične kese	7,22%
HDPE plastika	2,48%
Tekstil	4,65%
Koža	0,42%
Pelene	4,16%
Fini elementi (<20mm)	10,69%

Godišnja količina biorazgradivog otpada prisutna u čvrstom komunalnom otpadu u Srbiji iznosi oko 1,5 miliona tona, od čega 450.000 tona predstavlja zeleni otpad, 770.000 tona kuhinjski otpad, a 260.000 tona papir i karton (IMG 2015). Ova količina uključuje količinu biorazgradivog otpada pomešanu sa drugim kategorijama otpada i odvojeno prikupljen otpad.

Poljoprivredni ostaci

Poljoprivreda je jedan od najvažnijih sektora privrede u Srbiji. U toku poljoprivredne proizvodnje generišu se različite kategorije otpada u zavisnosti od vrste, oblasti i načina proizvodnje. Opšte uzev, u poljoprivredi se generiše više otpadnih materijala: plastika i plastična ambalaže (neopasna i opasna – npr. od pesticida), karton i papir, metal, drvo, staklo, gume, pepeo, životinjski otpad i žetveni ostaci, medicinski – veterinarski otpad, građevinski otpad i dr. Međutim, predmet ovog istraživanja jeste samo biorazgradivi otpad koji je nastao tokom uzgoja životinja i ostaci tokom ratarske proizvodnje.

Za ovo istraživanje razmatrani su svi materijali koji završavaju u sistemu upravljanja otpadom, ali i svi nusproizvodi koji se ne koriste na odgovarajući način. Na primer, definisana su dva toka biomase: 1. koji nisu obuhvaćeni analizom - biomasa nakon poljoprivredne proizvodnje, a ne može se sakupljati (korenje, donji deo stabljike itd.) i 2. uključeni u analizu - biomasa koja se može sakupiti (potencijal biomase - gornji delovi stabljike, stajnjak, grane u voćnjaku itd.).

Iako su podaci o površinama obradivog zemljišta, prinosu, stočnom fondu i poljoprivrednim gazdinstvima dostupni u okviru nacionalne statistike (RZS, 2013), podataka o poljoprivrednim ostacima koji su generisani, prikupljeni, korišćeni ili tretirani ima malo. U Nacionalnoj strategiji upravljanja otpadom (SGRS, 2010) procenjuje se da se svake godine generiše oko 350.000 tona poljoprivrednog otpada, što u stvari predstavlja količinu sakupljenog otpada. Međutim, ukupna količina poljoprivrednih ostataka procenjuje se na oko 13 miliona tona godišnje (ostaci od useva i stajsko đubrivo) (SGRS, 2010). Zbog velikog odstupanja podataka, ukupna količina ostatka iz poljoprivrede za ovu analizu je procenjena proračunom. Proračun se zasniva na podacima nastajanja ostataka po grlu stoke (tabela 3.3) i po hektaru (tabela 3.4). Primenjene su sledeće jednačine:

$$W_{\text{Stajnjak}} = \sum N_i * q_i * \frac{365}{1000}$$

W_{manure} — količina stajnjaka, $\frac{t}{\text{god}}$

N_i — broj životinja

q_i — stopa generisanja stajnjaka, $\frac{kg}{\text{dan}}$

$$W_{\text{ostatak od useva}} = \sum Y_i * \delta_i * x_i$$

$W_{\text{ostatak od useva}}$ — masa ostataka od useva, $\frac{t}{\text{god}}$

Y_i — površina pod određenom kulturom, $\frac{ha}{\text{god}}$

δ_i — prinos, $\frac{t_{\text{prinos}}}{ha}$

x_i — ostatak nakon žetve, $\frac{t_{\text{ostatak}}}{t_{\text{prinos}}}$

Tabela 3.3 Podaci o generisanju ostataka od uzgoja stoke (RZS, 2013)

Kategorija životinje	Parametri		
	N_i	$q_i = A + B$	
Krave	Broj, u hiljadama	A—Urin, kg dan ⁻¹	B—Feces, kg dan ⁻¹
Goveda do jedne godine	294	13	8
Goveda do 2 godine	124	22	14
Goveda preko 2 godine – muška grla	8	19	11
Goveda preko 2 godine – krave	58	28	17
Goveda preko 2 godine – muzne krave	437	34	21
Goveda—ukupno	920		
Konji	Broj, u hiljadama	A—Urin, kg dan ⁻¹	B—Feces, kg dan ⁻¹
Konji – ukupno	16	25	35
Svinje	Broj, u hiljadama	A—Urin, kg dan ⁻¹	B—Feces, kg dan ⁻¹
Prasad mase do 20 kg	953	0,4	0,9
Svinje mase od 20 do 49 kg	715	0,7	1,8
Tovne svinje mase od 50 do 79 kg	450	1,6	2,1
Tovne svinje mase 80 kg i više	592	2	2,5
Priplodne svinje - krmače	707	2,4	6,4
Priplodne svinje - nerastovi	23	3	6,5
Svinje—ukupno	3.236		
Ovce	Broj, u hiljadama	A—Urin, kg dan ⁻¹	B—Feces, kg dan ⁻¹
Ovce – ukupno	1.748	1,074	0,364

Koze	Broj, u hiljadama	A—Urin, kg dan ⁻¹	B—Feces, kg dan ⁻¹
Koze - ukupno	219	0,875	0,712
Živina	Broj, u hiljadama	Feces, kg dan ⁻¹	
Kokoši – brojleri	5.949	0,054	
Kokoši – ostala kokoš	10.650	0,18	
Ćurke	185	0,301	
Guske	65	0,25	
Patke	188	0,25	
Druga živina	131	0,25	
Živina – ukupno	17.167		

Tabela 3.4 Podaci o generisanju ostataka obrade poljoprivrednog zemljišta (RZS, 2013)

Kategorija	Parametar		
	Y_i	δ_i	x_i
Obradiva zemlja	Požnjevena površina, ha	Prinos, t ha ⁻¹	Odnos prinosa i ostatka nakon žetve
Pšenica	604.748	3,9	1
Ječam	90.803	3,6	1
Kukuruz	1.057.877	7,5	1
Ovas	30.732	2,4	1
Raž	5.699	2,1	1,2
Tritikale	22.265	4,1	1
Uljana repica	9.815	3,2	2
Šećerna repa	64.112	54,7	1
Suncokret	175.366	2,9	2
Soja	154.249	3,5	2
Obradiva zemlja	Površina, ha	Ostaci nakon žetve, orezivanja, t ha ⁻¹	Neutralni parametar = 1
Voćnjaci	146.473	3,4	1
Vinogradi	21.201	3,02	1

Mulj od prerade otpadnih voda

Ispuštanje neprečišćenih otpadnih voda predstavlja ključni izvor zagađivanja površinskih i podzemnih voda u Republici Srbiji. Ni veliki gradovi, kao što su glavni grad Beograd sa više od 1,6 miliona stanovnika i Novi Sad sa oko 300 hiljada stanovnika,

nemaju postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda i svoje otpadne vode netretirane ispuštaju u vodotokove.

Nivo izgrađenosti kanalizacione mreže u našoj zemlji u zaostatku je u odnosu na potrebe i evropske standarde. Prema državnoj statistici, samo 60% domaćinstava priključeno je na javnu kanalizaciju i ona generišu 400 miliona kubnih metara komunalnih otpadnih voda (RZS, 2017a).

Sve prikupljene otpadne vode trebalo bi da se podvrgnu tretmanu, međutim za sada u Srbiji ne postoji dovoljan broj postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, i uglavnom se otpadne vode samo sakupljaju bez naknadnog prečišćavanja. Prečišćava se samo 10% otpadnih voda, od čega je 10% primarno, 71% sekundarno, a 19% je tercijarno (PSUGZ, 2015; RSZ, 2017a; RZS, 2017b).

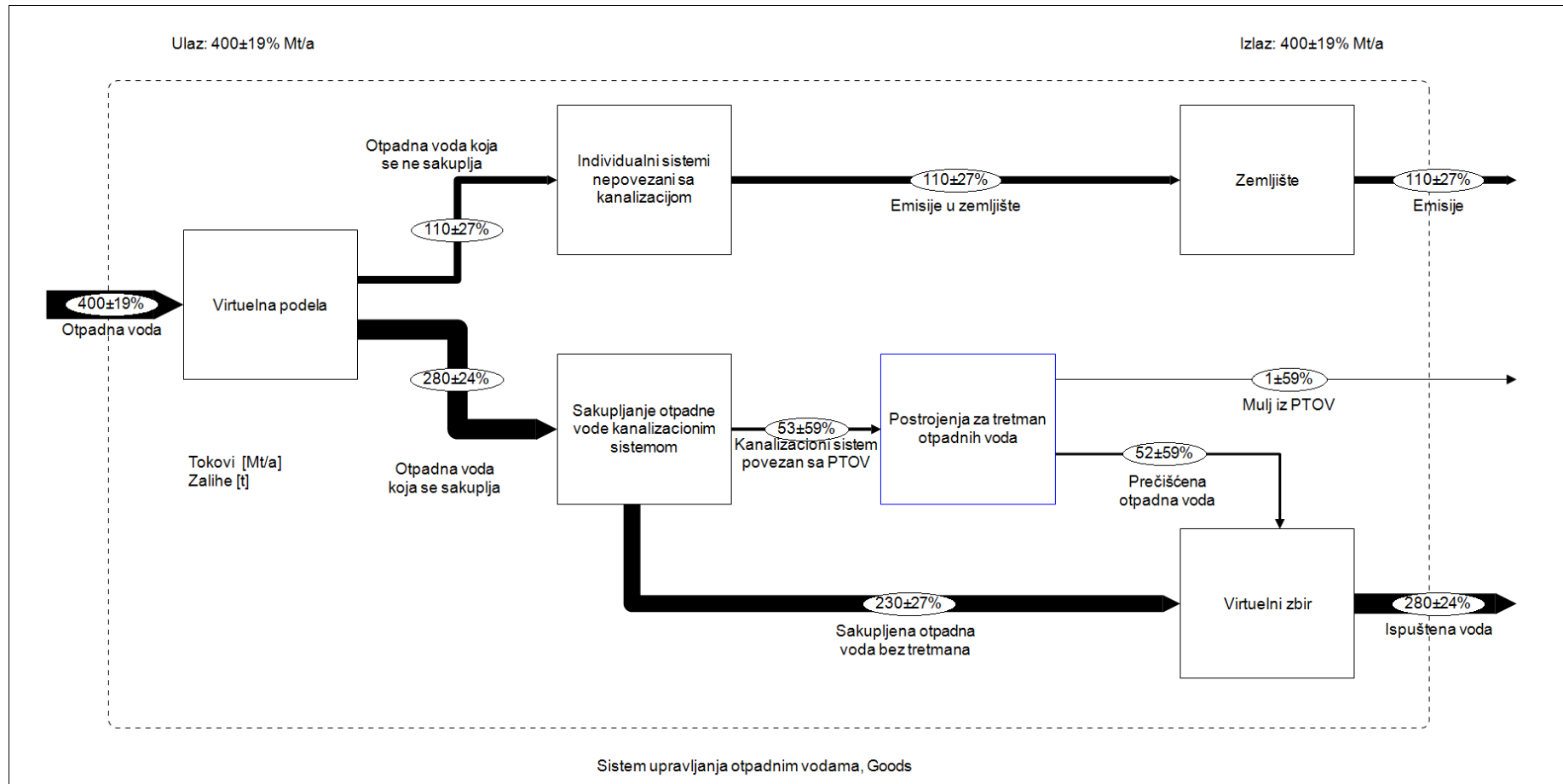
Trenutno su prema Strategiji upravljanja vodama u funkciji 32 postrojenja za prečišćavanje. Većina postrojenja ne radi kapacitetom i efikasnošću za koje su projektovana (SGRS 2017). Lista postrojenja za tretman otpadnih voda prikazana je u tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Lista postrojenja za tretman otpadnih voda (MAEP & EAA, 2019)

Lokacija PTOV	Projektovani kapacitet	Trenutni tretman	Postrojenja u funkciji
	(E.S.)	(E.S.)	(Da/Ne)
Sombor	180.000	25.451	DA
Vršac	90.000	41.866	DA
Vršac	2.000	43.393	NE
Bač	10.000	2.539	DA
Bački Petrovac	4.000	2.894	DA
Maglić	2.000	1.240	DA
Bečej	40.000	15.889	DA
Ada	7.150	2.963	DA
Kanjiža	8.000	13.218	DA
Kikinda	40.000	29.547	DA
Senta	17.000	20.346	DA
Subotica	150.000	94.389	DA
Stara Moravica	5.000	1.636	DA
Novi Bečej	2.000	5.650	NE
Pećinci	4.400	3.002	DA
Mačvanska Mitrovica	4.500	1.900	DA
Ruma	40.000	n/a	NE

Valjevo	50.000	76.895	DA
Lajkovac	7.500	n/a	NE
Šabac	84.000	63.942	DA
Gornji Milanovac	50.000	30.749	DA
Despotovac	5.000	15.166	DA
Paraćin	29.000	31.627	DA
Rekovac	2.000	n/a	NE
Jagodina	89.000	45.589	DA
Arandjelovac 1	25.000	26.442	DA
Arandjelovac 2	8.000	600	NE
Kragujevac	250.000	166.163	DA
Topola	8.000	4.852	DA
Kladovo	10.000	n/a	NE
Negotin	n/a	n/a	NE
Sokobanja	5.000	8.233	DA
Vlasotince	10.000	14.198	DA
Bela Palanka	20.000	n/a	NE
Dimitrovgrad	9.500	8.929	NE
Velika Plana	21.000	11.480	DA
Surdulica	15.000	14.571	NE
Trgovište	1.800	3.266	NE
Medveđa	6.000	4.037	DA

Sistem upravljanja otpadnim vodama u Republici Srbiji i procenjena količina generisanog vlažnog mulja sa 3% suve materije prikazana je na grafiku 3.1. Ova količina mulja je realno mnogo manja kada se izražava preko količine suve materije i iznosi 30.000 tona. Očekivano je da količina vlažnog mulja takođe bude mnogo manja, s obzirom na obim tretmana, kada bi se generisani mulj tretirao na odgovarajući način, procesima kao što su stabilizacija, ugušćavanje, presovanje, dehidratacija i dr. Nakon tretmana, trebalo bi da mulj ima oko 30% suve materije (Đurević i dr., 2019), čime bi se njegova količina smanjila deset puta.



Grafik 3.1 Upravljanje otpadnim vodama u Srbiji, podaci dati u Mt·god⁻¹

Industrijski biorazgradivi otpad

Biorazgradivi industrijski otpad uglavnom uključuje otpad koji se generiše u prehrambenoj industriji i drvnoprerađivačkoj industriji. Prema nacionalnoj statistici otpada, godišnje proizvedena količina industrijskog otpada biljnog i životinjskog porekla iznosi više od 300.000 tona. Otpad nastao preradom drveta iznosi 37.000 tona (RZS, 2012a; RZS, 2012b; RZS, 2015). Ove količine predstavljaju zvanične podatke o količini sakupljenog otpada i ne uzimaju u obzir tretirani otpad ili iskorišćeni otpad unutar same industrije, što takođe nije uključeno u analizu ovog istraživanja.

Šumska biomasa

U Srbiji šume pokrivaju oko 2,3 miliona hektara ili jednu trećinu ukupne teritorije (RZS, 2017a). Ukupna seča drveta u šumama Srbije iznosi 2,9 miliona m³ (RZS, 2016), dok se ukupna količina drvnih ostataka u šumama nakon seče procenjuje na 1,1 milion m³. Međutim, deo šumskog otpada već se koristi u različite svrhe, poput ogrevnog drveta. Neiskorišćeni šumski otpad procenjuje se na 0,6 miliona m³ (Energy Saving Group, 2007).

3.1.4 Definisanje procesa u okviru sistema

Upravljanje biorazgradivim otpadom sastoji se od procesa tretmana (transformacije materijala) i procesa odlaganja (skladištenje materijala). Procesi tretmana uključuju biološke, fizičke i termičke metode obrade otpada, dok procesi odlaganja uključuju procese odlaganja otpada na sanitarne i ostale deponije.

Sistem se sastoji od četiri glavna procesa tretmana otpada:

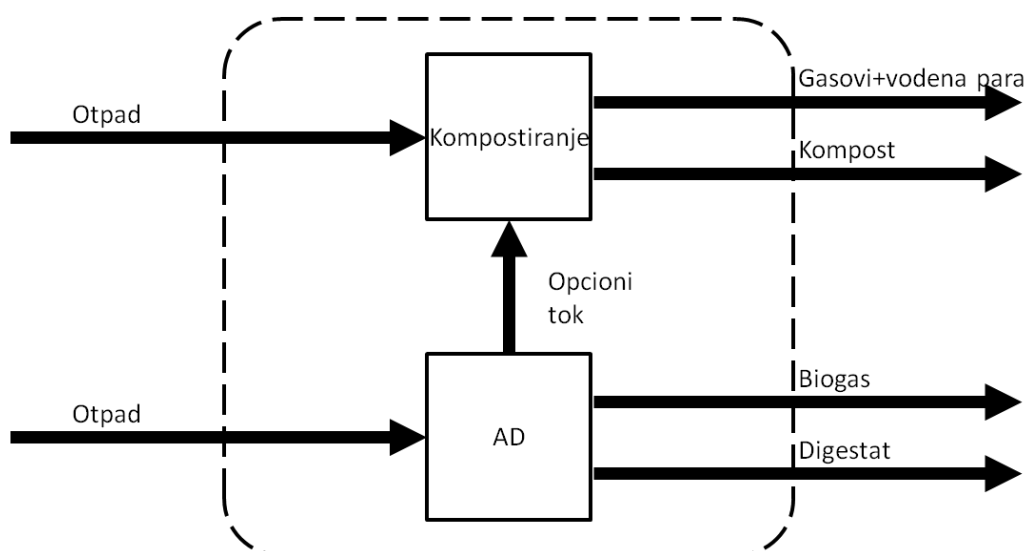
- I. Biološki tretman;
- II. Termički tretman;
- III. Reciklaža;
- IV. Deponovanje.

Proces - biološki tretman

Biološki tretman podrazumeva degradaciju organskih materijala sadržanih u otpadu. Degradacija i transformacija biološki razgradivih komponenti obično se obavlja pomoću aerobnih i anaerobnih tehnologija tretmana biorazgradivog otpada.

Proces biološkog tretmana uključuju podprocesse (slika 3.3):

1. Kompostiranje i
2. Anaerobna digestija (AD).



Slika 3.3 Proces biološkog tretmana otpada

Kompostiranje se definiše kao tretman biorazgradivog otpada pod dejstvom mikroorganizama u cilju stvaranja komposta, u prisustvu kiseonika i pod kontrolisanim uslovima (Das i dr., 2019). Kompost je materijal sličan humusu i može se koristiti kao sredstvo za kondicioniranje zemljišta ili kao đubrivo. Da bi kompost mogao da se koristi, potrebno je da ispunjava uslove o kvalitetu, odnosno da koncentracije kontaminanata, pogotovo teških metala, budu ispod dozvoljenih granica. Iz tog razloga je neophodno da se biorazgradivi otpad razdvaja na izvoru nastajanja.

Anaerobna digestija se definiše kao tretman u kome se biorazgradivi materijal razgrađuje u odsustvu kiseonika. Ako se pravilno kontroliše, anaerobna digestija će proizvesti biogas, mešavinu metana i ugljen-dioksida, i digestat, ostatak mulja koji se sastoji od neorganskih jedinjenja, nesvarene organske materije i vode.

Transfer koeficijenti procesa kompostiranja i AD prikazani su u tabeli 3.6.

Tabela 3.6 Primenjeni transfer koeficijenti za biološke tretmane (Ilić-Krstić i dr., 2018; Seyhan, 2006)

Proces	Izlazni tokovi iz procesa	
	Kompost	Gasovi +vodena para
Kompostiranje		
<i>Ukupna masa</i>	0,7	0,3
<i>Fosfor</i>	0,01	0,99
AD	Biogas	Digestat
<i>Ukupna masa</i>	0,15	0,85
<i>Fosfor</i>	0	1

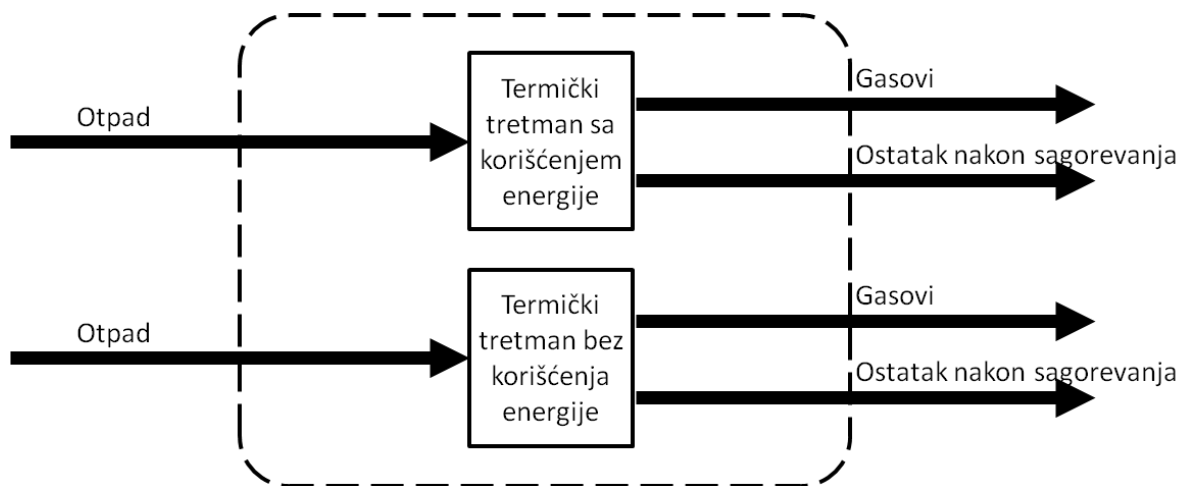
I u slučaju kompostiranja i AD obavezna je separacija biorazgradivog otpada od mešanog otpada kako bi krajni proizvod imao upotrebnu vrednost. Izdvajanje i tretman biorazgradivog otpada, i samim tim njegovo preusmeravanje od deponija, ima više benefita po životnu sredinu, kao što je: smanjenje gasova staklene bašte, smanjenje generisanja procednih voda na deponijama, povećanje toplotne moći ostatka otpada (Katinas i dr., 2019).

U Srbiji ne postoji odvojeno prikupljanje biootpada prisutnog u komunalnom otpadu i samo se deo zelenog otpada sa javnih površina tretira. U funkciji su tri biogas postrojenja koja proizvode električnu energiju, i kao sirovinu i kosirovinu koriste stajnjak (Cvetković i dr., 2014).

Proces - termički tretman

Proces termičkog tretmana podrazumeva spaljivanje kako bi se termički razgradili otpadni materijali.

Termički tretman uglavnom podrazumeva iskorišćenje energije iz odgovarajućeg otpada. Međutim, ovaj proces u ovoj analizi uključuje i sagorevanje određenih kategorija otpada bez iskorišćenja energije (slika 3.4). Suprotno tome, ovaj proces ne uključuje nelegalnu praksu sagorevanja poljoprivrednih ostataka.



Slika 3.4 Proces termičkog tretmana otpada

Tehnologije termičkog tretmana uključuju:

1. Insineraciju komunalnog otpada sa iskorišćenjem energije ili bez nje
2. Monoinsineraciju

Insineracija komunalnog otpada podrazumeva spaljivanje mešanog MSW ili ostatka nakon izdvajanja korisnih frakcija u postrojenjima koji se zovu insineratori. Tokom ovog procesa biorazgradivi sadržaj u otpadu se sagoreva i time generiše dve vrste pepela: leteći pepeo (karakteriše se kao opasan otpad) i pepeo sa dna (karakteriše se kao neopasan).

Monoinsineracija podrazumeva spaljivanje samo jednog toka materijala. Za ovaj vid tretmana veoma je pogodna biomasa, pri čemu se može razmotriti iskorišćenje nastalog pepela.

Transfer koeficijenti procesa termičkog tretmana prikazani su u tabeli 3.7.

Tabela 3.7 Primenjeni transfer koeficijenti za termičke tretmane (Stanisavljević, 2013; Zoboli, 2016)

Proces	Izlazni tokovi iz procesa				
Insineracija	Gasovi	Ostatak nakon sagorevanja			
	Otpadni gasovi	Leteći pepeo	Pepeo sa dna	Otpadne vode	Filterski kolač
<i>Ukupna masa</i>	0,7	0,025	0,27	0,01	0,01
<i>Ukupna masa – grupisani</i>	0,7	0,3			
<i>Fosfor</i>	0	1			
Monoinsineracija	Gasovi	Ostatak nakon sagorevanja – pepeo			
<i>Ukupna masa</i>	0,7	0,3			
<i>Fosfor</i>	0	1			

Proces - reciklaža

Proces reciklaže podrazumeva izdvajanje materijala iz otpada i njegovo ponovno korišćenje. Reciklaža uključuje sakupljanje, izdvajanje, preradu i izradu novih proizvoda od izdvojenih sekundarnih sirovina.

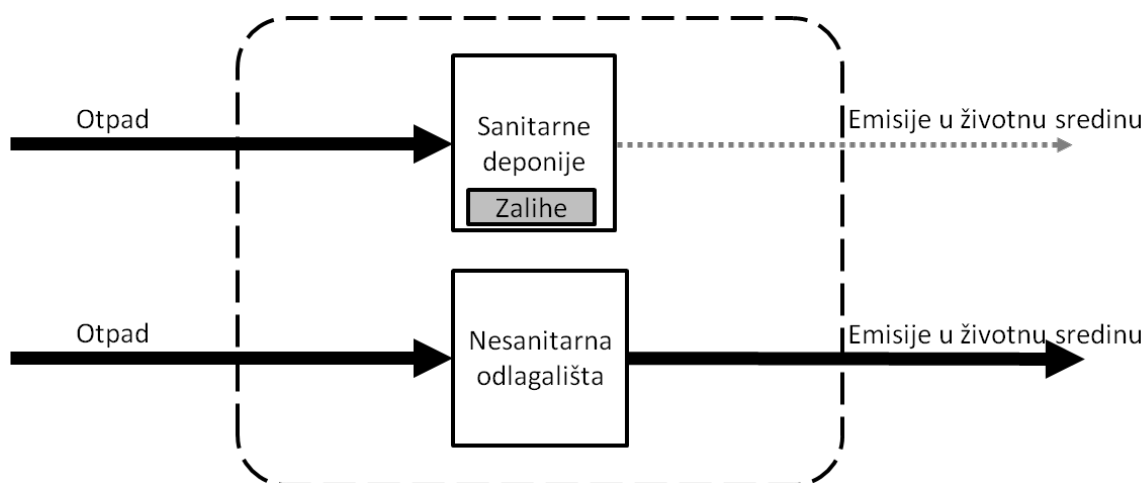
U okviru ovog sistema, proces reciklaže podrazumeva izdvajanje papira, kartona i drveta iz komunalnog i industrijskog otpada.

Proces - deponovanje

Deponovanje je termin koji se koristi da se opiše proces kojim se otpad odlaže na deponiju. Termin „sanitarna deponija” odnosi se na objekat za odlaganje otpada dizajniran i korišćen na takav način da je uticaj na zdravlje i životnu sredinu sveden na

najmanju moguću meru. Odlagališta otpada gde se otpad ne odlaže na organizovan način, već direktno na zemlju zovu se nekontrolisana odlagališta ili divlje deponije.

Proces deponovanja se sastoji od odlaganja otpada na sanitarne deponije i nesanitarna odlagališta (slika 3.5). Deponovani otpad na sanitarnim deponijama se smatra zalihom sistema, dok se materijal koji se odlaže na kontrolisanim deponijama i lokacijama za nesanitarno odlaganje smatra emisijom iz sistema za upravljanje otpadom zbog nepostojanja barijere ka životnoj sredini (Vujić i dr., 2017).



Slika 3.5 Proces deponovanje otpada

3.1.5 Definisane tokova fosfora

Nakon sprovedene analize tokova materijala, analiziraju se tokovi fosfora. Količina fosfora najčešće se računa na osnovu koncentracija.

Koncentracije fosfora u svakom toku variraju u različitim zemljama i zavise od načina proizvodnje, generisanja ili nivoa tretmana (Cordell i dr., 2011). Zbog nedostupnosti specifičnih podataka za Srbiju, u ovom istraživanju su primenjene vrednosti tokova i koncentracija P iz odgovarajuće literature. Konkretno, maseni tokovi P za različite kategorije biorazgradivog otpada (tabela 3.8) izračunavaju se korišćenjem različitih literaturnih podataka (Cordell i dr., 2011; Tompkins, 2006).

Tabela 3.8 Koncentracije fosfora u pojedinim tokovima biorazgradivog otpada (Cordell i dr., 2011; Tompkins, 2006)

Tok biorazgradivog otpada	Koncentracija P, (% maseno u vlažnoj materiji)
Otpad od hrane	0,35
Baštenski otpad	0,15
Papir i karton	0,017
Ostaci od ratarskih kultura	0,04–0,33
Stajnjak	1,27
Ostaci od drveta	0,01
Životinjski otpad iz prehrambene industrije	0,42
Biljni otpad iz prehrambene industrije	0,23

Emisije fosfora u otpadnim vodama su specifične za zemlju porekla. Količina u otpadnoj vodi zavisi od ostataka hrane koji završe u kanalizaciji i uzima se u obzir upotreba deterdženta sa fosforom. Koeficijent emisije fosfora koji je usvojen za Srbiju u okviru Plana upravljanja slivom reke Dunav dnevno iznosi 1,8 g P po ES (ICPDR, 2009).

Količina P koja će se nalaziti u mulju nakon tretmana otpadne vode zavisi od nivoa tretmana i efikasnosti tretmana da izdvoji fosfor iz otpadne vode. Ukupno smanjenje fosfora 10–30% postiže se primarnim tretmanom, smanjenje P za 30–50% postiže se ako se uključi sekundarni tretman, a smanjenje od 90% postiže se tercijarnim tretmanom (ICPDR, 2009; Spellman, 2014; Egle et al., 2016; Ghawi, 2018).

3.1.6 Nesigurnost podataka

Nesigurnost podataka u MFA proizlazi iz rada sa nepouzdanim ili konfliktnim podacima, promenljivosti određenih tokova i koncentracija, kao i tokova koji se mogu samo približno proceniti. Za potrebe procene nepoznatih tokova može se koristiti balansiranje sistema na osnovu prikupljenih podataka.

Za procenu nesigurnosti podataka korišćena je metoda predstavljena u Laner i dr. (2015) i koju su Klinglmair i dr. (2015) primenili na tokove fosfora. Ovde su izvori podataka podeljeni na pet nivoa nesigurnosti i dodeljeni su odgovarajući koeficijenti varijacije. Ovaj model zasnovan je na pristupu Hedbrant i Sorme (2001), a modifikovali su ga Laner i dr. (2015). Koeficijenti varijacije zavise od izvora podataka: 15% za podatke iz nacionalne zvanične statistike za godinu za koju se vrši istraživanje, 30% za podatke iz nacionalne zvanične statistike sa odstupanjem 1–5 godina od izabrane godine, 45% za

podatke iz naučne literature koji se ne odnose na Srbiju, 60% za informacije dobije od operatera postrojenja i 75% za procenu stručnjaka.

3.1.7 Grafički prikaz modela

Rezultati analize će biti prikazani u okviru programskog paketa STAN (Cencic and Rechberger, 2008). Ovaj program je posebno razvijen za potrebe MFA i omogućava transparentno balansiranje, usklađivanje podataka (data reconciliation) i vizuelizaciju sistema na nivou dobara i supstanci, pri tome uzimajući nesigurnost podataka u obzir.

Ovaj besplatni program pruža grafičkih prikaz materijalnih tokova, procesa i granica sistema. Omogućuje unos podataka o masenim tokovima, koncentracijama supstanci i transfer koeficijentima. Takođe je moguće istovremeno modelovanje tokova i zaliha na oba nivoa, nivo dobara i nivou supstanci. Upotreba transfer koeficijenata je posebno pogodna za izračunavanje izlaznih tokova iz procesa u okviru STAN-a.

3.2 RAZVOJ CILJNO ORIJENTISANIH SCENARIJA UPRAVLJANJA BIORAZGRADIVIM OTPADOM

3.2.1 Okvir EU za unapređenje sistema upravljanja biorazgradivim otpadom

Srbija kao kandidat za EU treba da dostigne standarde u upravljanju otpadom koji su postavljeni u EU. Zakonska regulativa koja definiše ciljeve EU koji se odnose na sektor upravljanja biorazgradivim otpadom sadržana je u okviru sledećih direktiva:

1. Direktiva Saveta 99/31/EC o deponijama – Ova direktiva ima za cilj da se uvođenjem strogih tehničkih zahteva minimalizuju negativni efekti odlaganja otpada na deponije na životnu sredinu i zdravlje stanovništva.
 - Definisani su ciljevi za smanjenje odlaganja biorazgradivog otpada.
2. Direktiva Saveta 2008/98/EC o otpadu koja zamenjuje i dopunjuje Okvirnu direktivu 75/442/EEC, 2006/12/EC – Ovom direktivom se uspostavlja sistem za koordinirano upravljanje otpadom u EU sa ciljem da se ograniči proizvodnja otpada.
 - Postavljeni su ciljevi za ponovnu upotrebu i reciklažu reciklabilnih materijala.

3. Direktiva 86/278/EEC o zaštiti životne sredine i posebno zemljišta u slučaju korišćenja sekundarnih đubriva u poljoprivredi – Ovom direktivom se definiše upotreba muljeva iz postrojenja za tretman otpadnih voda u poljoprivredi.
 - Regulisani su uslovi za upotrebu kanalizacionog mulja u poljoprivredi.
4. Direktiva Saveta 91/271/EEC odnosi se na prečišćavanje urbanih otpadnih voda – Ovom direktivom se zahteva sakupljanje i sekundarni tretman otpadnih voda u naseljima sa više od 2.000 ekvivalent stanovnika i naprednijim tretmanom za naselja sa više od 10. 000 ekvivalent stanovnika.
 - Kontrolise se odlaganje i upotreba kanalizacionog mulja.
5. Direktiva Saveta 94/62/EC o ambalaži i ambalažnom otpadu dopunjena Direktivom 2005/20/EC, 2004/12/EC, 1882/2003/EC – Ovom direktivom definiše se strategija EU o otpadu od ambalaže i ima za cilj da harmonizuje nacionalne mere za upravljanje otpadom od ambalaže, da minimizira uticaje otpada od ambalaže na životnu sredinu.
 - Definisani su ciljevi za ponovno iskorišćenje i reciklažu ambalažnog otpada.
6. Direktiva Saveta 2000/76/EC o spaljivanju otpada – Postavlja standarde za smanjenje zagađenja vazduha, vode i zemljišta uzrokovanog insineracijom ili koincineracijom otpada, radi sprečavanja rizika po ljudsko zdravlje.

3.2.2 Nacionalni ciljevi upravljanja biorazgradivim otpadom

Kroz nacionalnu regulativu usvojeni su propisi i postavljeni ciljevi upravljanja biorazgradivim otpadom, kao i rokovi za njihovo dostizanje. Ključni zakonski akti kojima se reguliše sistem upravljanja biorazgradivim otpadom jesu Zakon o upravljanju otpadom („Sl. glasnik RS“, 36/2009 i 88/2010) i Strategija upravljanja otpadom za period 2010 – 2019. godine („Sl. glasnik RS“, 29/2010). Podzakonska akta su:

- Uredba o odlaganju otpada na deponije („Sl. glasnik RS“, br. 92/2010)
- Uredba o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada za period od 2015. do 2019. godine („Sl. glasnik RS“, br. 144/2014)
- Uredba o vrstama otpada za koje se vrši termički tretman, uslovima i kriterijumima za određivanje lokacije, tehničkim i tehnološkim uslovima za projektovanje, izgradnju, opremanje i rad postrojenja za termički tretman otpada, postupanju sa ostatkom nakon spaljivanja („Sl. glasnik RS“, br. 102/2010 i 50/2012)

Specifični ciljevi upravljanja biorazgradivim otpadom usvojeni u nacionalnom zakonodavstvu su:

1. U okviru Uredbe o odlaganju otpada na deponije usvojeni su ciljevi za smanjenje količine odlaganja biorazgradivog otpada na deponije u iznosu od 75%, 50% i 35% od količine otpada odloženog u 2008. godini, a rokovi su prilagođeni prema Stanisavljević i dr., od 2008. do 2022, 2026. i 2030. godine.
2. U okviru Strategije za upravljanje otpadom Republike Srbije postavljeni su ciljevi za povećanje pokrivenosti organizovanim sistemom sakupljanja otpada do najmanje 90% stanovnika do kraja 2020. godine, kao i izgradnja regionalnih centara sa sanitarnim deponijama za najmanje 90% stanovnika do kraja 2020. godine.
3. U okviru Uredbe o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada za period od 2010. do 2014. godine definisani su specifični ciljevi za reciklažu ambalažnog otpada, koji za papir i karton iznose 28% za 2014. godinu. Ovaj nacionalni cilj je ispunjen, što pokazuju Izveštaji o upravljanju ambalažom i ambalažnim otpadom u Republici Srbiji Agencije za zaštitu životne sredine. Da bi se postigla potpuna usklađenost sa EU direktivom, cilj je postići stopu reciklaže od 55% i stopu ponovnog iskorišćenja od 60%.

3.2.3 Unapređenje i promene u okviru sistema upravljanja otpadom

Prilikom razvoja alternativnih scenarija za upravljanje biorazgradivim tokovima otpada, prvenstveno su postavljeni opšti ciljevi, koji se moraju ispuniti tokom unapređenja sistema upravljanja otpadom u okviru svakog scenarija.

Unapređenje razvoja sistema prilikom razvoja alternativnih scenarija su:

1. Smanjenje na 35% biorazgradivog otpada koji se deponuje od količine generisane u 2008. godini.

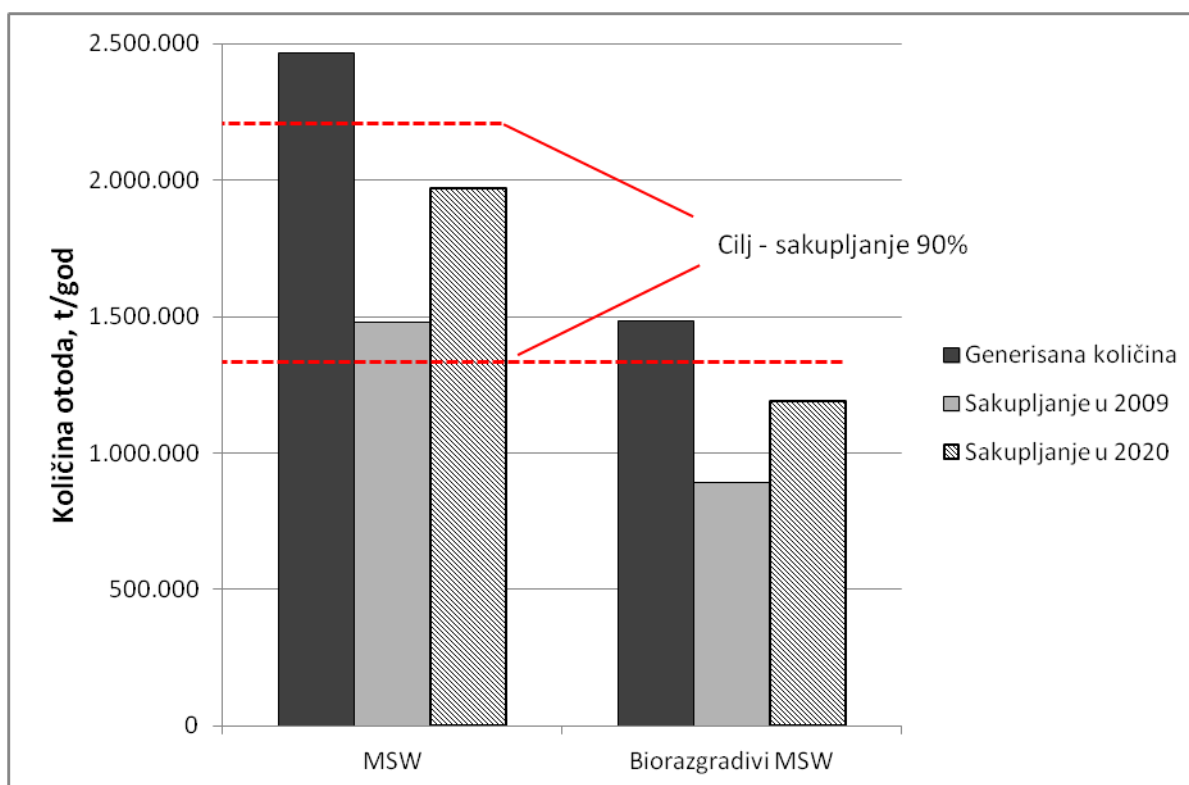
Podaci za Srbiju pokazuju da su se u 2008. godini generisale 2.374.374 tone otpada. Na osnovu udela biorazgradivog otpada prikazanog u tabeli 3.9, izračunata je količina od 1.453.829 tona biorazgradivog otpada. Smanjenje na 35% od ove količine znači da će se na deponiju smeti odložiti 413.521 tona biorazgradivog otpada.

Tabela 3.9 Udeo biorazgradivog otpada u MSW u 2008. godini (SGRS, 2010)

Kategorija biorazgradivog otpada	Procentualni udeo
Zeleni otpad	12,14%
Ostali biorazgradivi otpad	37,62%
Papir	5,34%
Karton	6,13%
Ukupno	61,23%

2. Povećanje procenta sakupljanja otpada na 90%

U vreme donošenja strategije 2009. godine, procenjeno je da se organizovano sakuplja 60% komunalnog otpada, dok taj procenat 2020. godine iznosi oko 80%. Cilj postavljen strategijom nije još uvek ispunjen, ali evidentan je značajan napredak (grafik 3.2). U oba scenarija je predviđeno ispunjenje ovog cilja.



Grafik 3.2 Procenat sakupljanja otpada (SGRS, 2010; MAEP & EAA, 2019)

3. Izgradnja sanitarnih deponija za 90% stanovnika

Odlaganje otpada na nesanitarna odlagališta predstavlja prioritetan problem, za čije rešavanje je potrebno izdvojiti značajna sredstva za izgradnju kapaciteta. Trenutno je izgrađeno i aktivno 11 sanitarnih deponija (tabela 3.10), a prema Strategiji je planirano odlaganje otpada na ukupno 26 deponija. Pored toga, otpad se organizovano odlaže i na 164 nesanitarna, ali kontrolisana odlagališta, dok divljih odlagališta ima preko 3600 (Stanisavljević i dr., 2012).

Tabela 3.10 Sanitarne deponije u Srbiji (AZŽS, 2019)

Izgrađene i funkcionalne regionalne sanitarne deponije	
1.	Regionalna sanitarna deponija „Duboko“, Užice
2.	Regionalna sanitarna deponija „Vrbak“, Lapovo
3.	Regionalna sanitarna deponija Kikinda
4.	Regionalna sanitarna deponija „Gigoš“, Jagodina
5.	Regionalna sanitarna deponija „Željkovac - Deponija dva“, Leskovac
6.	Regionalna sanitarna deponija „Muntina padina“, Piroć
7.	Regionalna sanitarna deponija „Jarak“, Sremska Mitrovica
8.	Regionalna sanitarna deponija Pančevo
9.	Sanitarna deponija „Meteris“, Vranje
10.	Sanitarna deponija lokalnog karaktera u opštini Gornji Milanovac
11.	Regionalna sanitarna deponija Subotica – još uvek je u probnom radu
Regionalne deponije u izgradnji	
1.	Regionalna sanitarna deponija Nova Varoš
2.	Regionalna sanitarna deponija Inđija

U oba scenarija je predviđeno da se otpad sakupljen od 90% stanovništva odlaže na sanitarne deponije. Ovo ne znači da će se sav sakupljen otpad direktno odlagati, već da će se frakcija planirana za deponovanje odlagati na sanitarnim deponijama. Da bi se to postiglo, potrebna je izgradnja kapaciteta do planiranih 26 sanitarnih deponija prema strategiji.

4. Generisana količina mulja nastala kada je 85% stanovništva povezano na kanalizacionu mrežu i odgovarajućim tretmanom

Količinu mulja koja će se generisati nakon tretmana vrlo je teško proceniti jer zavisi od brojnih faktora koji još nisu definisani. Gruba procena je da, u zavisnosti od

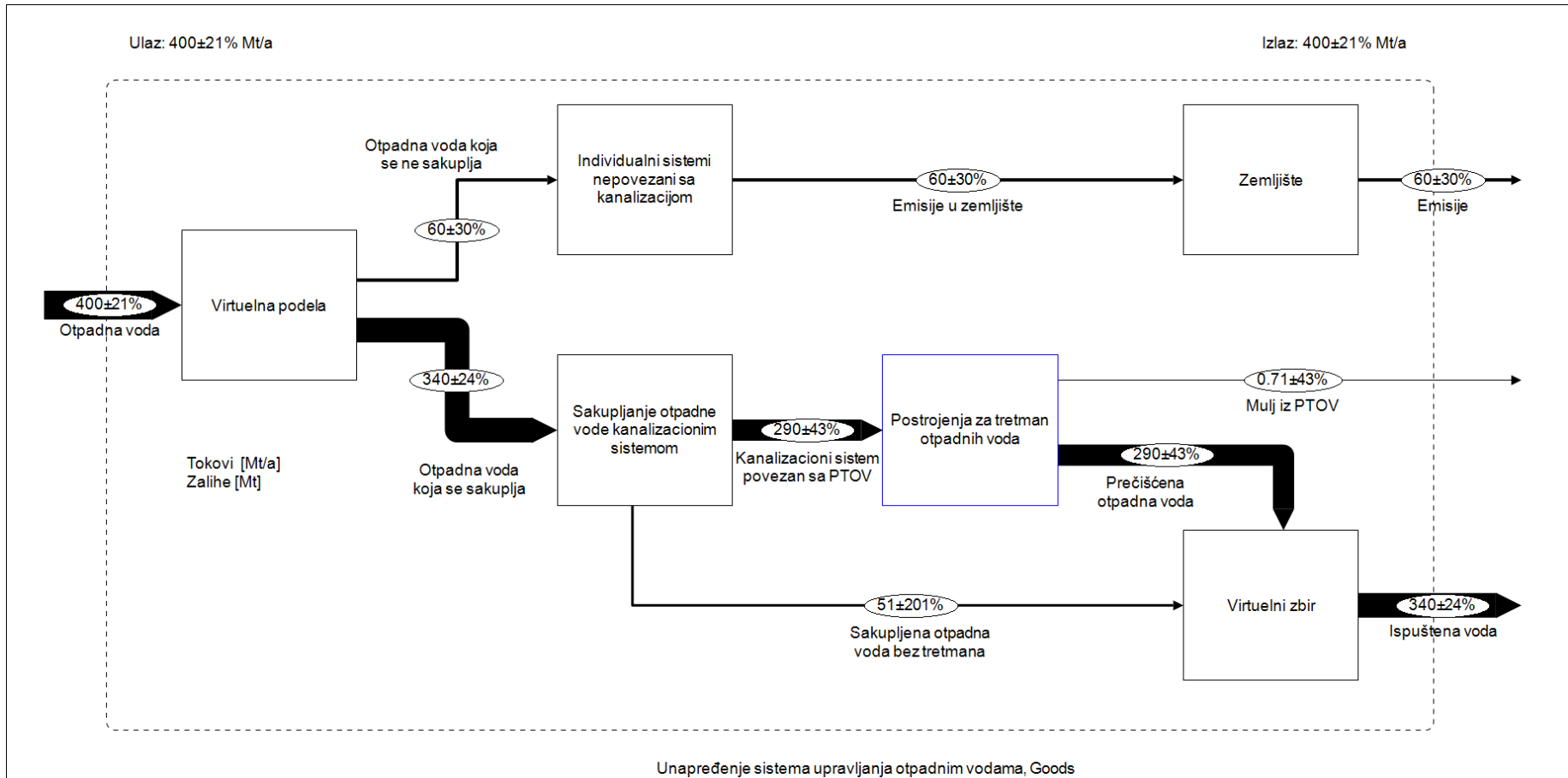
stepena tretmana, oko 0,5% količine tretirane otpadne vode predstavlja mulj (Al-Muzaini & Hamoda, 1999). Ako primenimo na ukupnu količinu otpadne vode koja se generiše, može se očekivati da će i nakon tretmana biti potrebno upravljati sa oko 7.100.000 tona vlažnog mulja sa 3% suve materije. Količina mulja se značajno smanjuje nakon tretmana mulja, gde količina suve materije iznosi oko 30% (Đurević i dr., 2019), kao što je prikazano na grafiku 3.3.

3.2.4 Definisane scenarije

Osnov za dalje definisanje alternativnih scenarija zasnovan je na činjenici da je i samim državama članicama ostavljeno da same izaberu način na koji će ispuniti zadate ciljeve. U ovoj disertaciji analizirana su dva pravca unapređenja sistema upravljanja biorazgradivim otpadom, na osnovu kojih su razvijena i dva alternativna scenarija u upravljanju otpadom:

1. Prvi je očuvanje resursa, gde su sve aktivnosti usmerene da se sto više resursa ponovno upotrebi ili kao sekundarna sirovina ili kao novi resurs.
2. Drugi pravac je maksimalno iskorišćenje energije koja se nalazi u biorazgradivom otpadu.

Prilikom definisanja scenarija nisu analizirane buduće promene u količini i sastavu generisanog otpada, a koje su povezane sa promenama broja stanovnika, promenom budućeg sastava otpada, promenom u broju i vrsti uzgajane stoke, površinom obradivog zemljišta i zasejanih kultura i sl. Količina svih generisanih tokova biorazgradivog otpada je nepromenjena u svim scenarijama u odnosu na trenutno stanje, osim u slučaju mulja nakon tretmana otpadnih voda, gde je količina otpadne vode nepromenjena, a količina izdvojenog mulja povećana.



Grafik 3.3 Promene u upravljanju otpadnim vodama u Srbiji, podaci dati u Mt·god⁻¹

3.2.5 Scenario 1 - Upravljanje otpadom sa ciljem očuvanja resursa

Scenario upravljanja otpadom koji ima za cilj očuvanje resursa jeste alternativni scenario sa ciljem da predvidi moguće tokove materijala ukoliko se implementiraju procesi kojima se omogućava ponovno iskorišćenje materijala iz otpada. Iako je izbor procesa kojima se to može postići veliki, zbog same prirode biorazgradivog otpada oni mogu da budu nisko tehnološkozahtevni i ekonomični. Stoga, osim ispunjenja postavljenih opštih ciljeva u ovom scenariju, predviđena je implementacija ekonomičnih i tehnološki manje zahtevnih procesa.

Prilikom razvoja scenarija potrebno je prvo definisati materijale koje je moguće iskoristiti iz otpada kako bi se postiglo očuvanje prirodnih resursa. Materijali koji imaju upotrebnu vrednost u posmatranom sistemu su:

- Kompost – ostatak nakon biološkog tretmana biorazgradivog otpada;
- Kanalizacioni mulj – ostatak nakon tretmana otpadnih voda;
- Papir i karton – reciklabilni materijali izdvojeni primarnom separacijom;
- Stajnjak – nusproizvod uzgoja životinja.

Upotreba i iskorišćenje prethodno definisanih materijala postiže se kroz sledeće procese upravljanja biorazgradivim otpadom:

- Kompostiranje:

Proces kompostiranje podrazumeva tretman biootpada iz MSW u količini koja će omogućiti ispunjenje cilja smanjenja biorazgradivog otpada na deponijama. Predviđa se kompostiranje zelenog otpada i ostalog biorazgradivog otpada iz domaćinstava, dok se papir i karton recikliraju.

- Upotreba mulja:

Karakteristika mulja nakon tretmana otpadnih voda jeste da se u njemu nalaze materije koje su prvobitno bile u otpadnoj vodi i koje su izdvojene kako bi se ona prečistila. Ovo se odnosi i na teške metale i druge zagađujuće materije. Od koncentracije zagađujućih materija u mulju zavisi i mogućnost njegove direktne upotrebe u svrhu kondicioniranja zemljišta, bilo pri uređenju ili pri upotrebi u poljoprivredi, gde su uslovi znatno stroži. Količinu upotrebljenog mulja teško možemo predvideti, pa je zbog toga količina procenjena na osnovu iskustava iz drugih zemalja (Seyhan, 2006; Egle i dr., 2014; Senthilkumar i dr., 2012; Klinglmair i dr., 2015).

- **Reciklaža:**

Proces podrazumeva reciklažu papira i kartona. Cilj postavljen Uredbom o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada koji se odnosi na papir i karton iznosi 28%. Međutim, da bi se cilj uskladio sa EU direktivom, potrebno je postići stopu reciklaže od 55%.

- **Efikasnije upravljanje stajnjakom:**

Ova mera ne podrazumeva nov proces, već samo unapređenje postojećeg sistema skladištenja i upotrebe stajnjaka, pri čemu dolazi do manjih gubitaka i emisije iz poljoprivrede.

Ograničenja koja su postavljena su:

1. Dozvoljeno je odlaganje samo 35% biorazgradivog MSW od količine generisane 2008. godine, ostatak se kompostira;
2. Zahteva se unapređenje sistema skladištenja stajnjaka koje će dovesti do smanjenja emisije iz poljoprivrede;
3. Predviđa se korišćenje do 30% mulja iz WWTP za uređenje zemljišta i u poljoprivredi;
4. Predviđa se reciklaža 55% ambalažnog papira i kartona.

3.2.6 Scenario 2 - Upravljanje otpadom sa ciljem iskorišćenja energije

U ovom scenariju, radi ostvarenja cilja očuvanja energije, definisani su materijali čiji energetski potencijal može da se iskoristi za proizvodnju toplotne i električne energije. Proizvodnja energije zahteva kompleksnije procese transformacije, što ima za rezultat scenario sa implementiranim ekonomski i tehnološki zahtevnim procesima.

Materijali u posmatranom sistemu koji mogu da se iskoriste za dobijanje energije su:

- Biorazgradivi otpad iz MSW;
- Poljoprivredna i šumska biomasa;
- Poljoprivredna biomasa koja predstavlja sirovinu za dobijanje biogasa.

Procesi kojima se omogućava iskorišćenje energetskeg potencijala prethodno definisanih materijala su:

- Termički tretman u cilju dobijanja toplotne i/ili električne energije:

Ovaj proces u okviru termičkog tretmana podrazumeva postrojenja koja će sagorevati poljoprivrednu i šumsku biomasu u cilju proizvodnje toplotne i električne energije. Količina poljoprivredne biomase koja će se sagorevati usklađena je sa količinom energije koja se prema strategiji razvoja energetike planira proizvesti iz ovog izvora.

- Anaerobna digestija poljoprivrednih ostataka:

Anaerobna digestija podrazumeva tretman ostataka od uzgoja životinja u cilju proizvodnje biogasa i njegovog korišćenja za dobijanje energije. Za potrebe ovog tretmana opravdano je sakupljati otpad samo sa većih farmi za uzgoj životinja.

- Insineracija otpada:

Ovaj proces u okviru termičkog tretmana otpada podrazumeva insineraciju mešanog komunalnog otpada u okviru koga se nalazi biorazgradivi otpad.

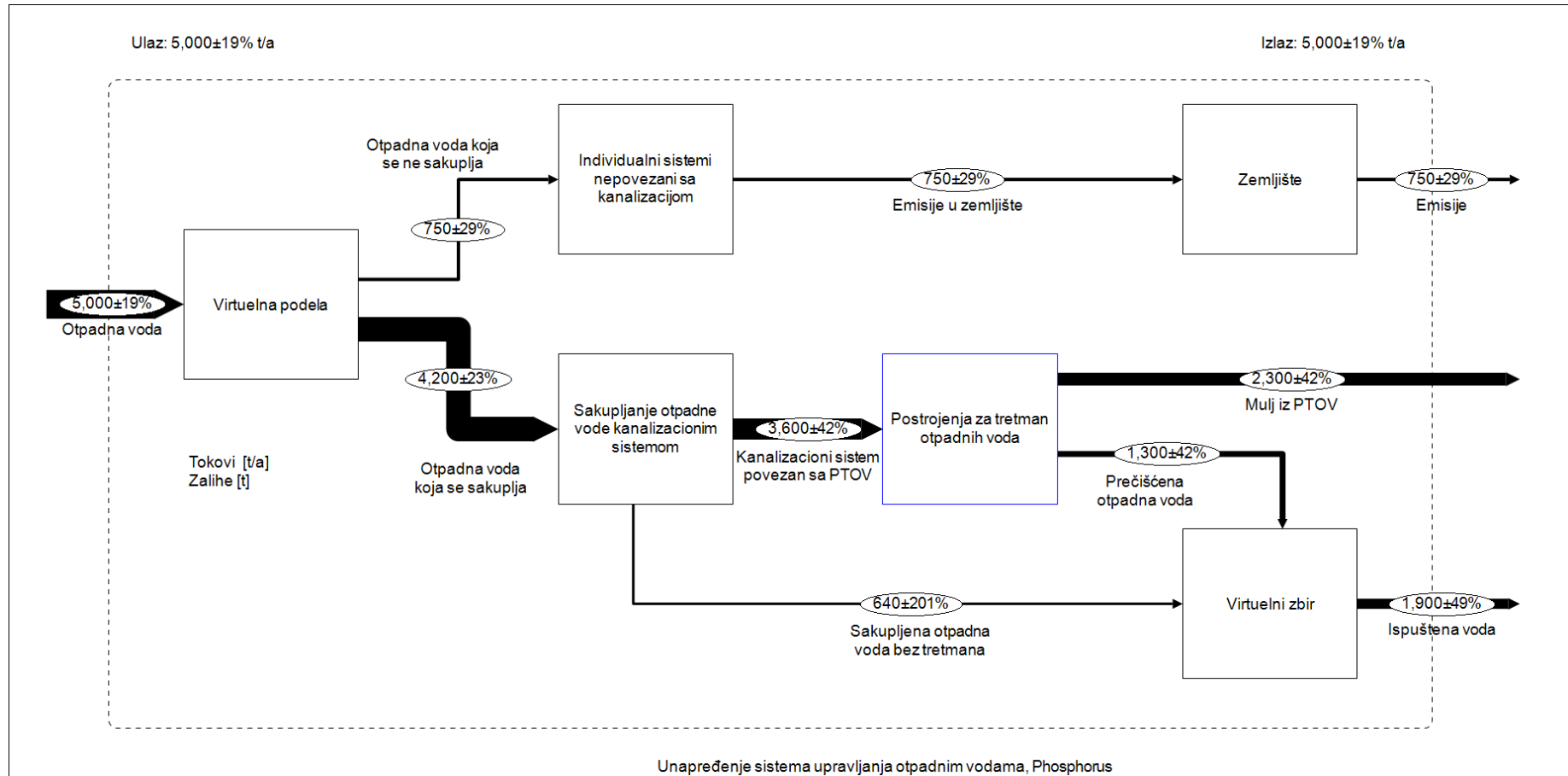
Ograničenja koja su postavljena su:

1. Dozvoljeno je odlaganje samo 35% biorazgradivog MSW od količine generisane 2008. godine, ostatak ide na insineraciju;
2. Može se očekivati da se 50% šumskog otpada sakupi u cilju njegovog iskorišćenja za dobijanje energije;
3. Sirovina za AD je sakupljena sa farmi sa preko 20 grla stoke;
4. Iskorišćenje potencija biomase za sagorevanje i proizvodnju energije u skladu sa strategijom energetike, gde se planira proizvodnja energije iz poljoprivredne biomase od 1.272.100 ten (tona ekvivalent nafte).

3.2.7 Analiza tokova fosfora u alternativnim scenarijima

Nakon razvoja alternativnih scenarija, sprovedena je analiza tokova fosfora za svaki od njih. Ova analiza izvršena je sa ciljem vrednovanja uticaja implementiranih promena u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom na tokove fosfora, posebno na tokove koji predstavljaju potencijalni resurs ili emisiju u životnu sredinu.

Koncentracije P u okviru ulaznih tokova nisu se menjale, dok su promene u tokovima nakon tretmana posledica implementiranih promena. Do promene količine fosfora u mulju iz PTOV došlo je zbog promena u sistemu upravljanja otpadnim vodama, koje su dovele do promena u količini i karakteristikama samog mulja (grafik 3.3). Očekivane promene u tokovima fosfora u sistemu upravljanja otpadnim vodama u Srbiji prikazane su na grafiku 3.4. Opisanim načinom tretmana i količinom tretirane otpadne vode izdvojiće se u okviru mulja 2.300 tona fosfora godišnje.



Grafik 3.4 Promene u tokovima fosfora u upravljanju otpadnim vodama u Srbiji, podaci dati u $t \cdot P \cdot god^{-1}$

3.3 POSTUPAK EVALUACIJE I POREĐENJA SCENARIJA - KRITERIJUMI ZA OCENU

Nakon definisanja i kvantifikacije alternativnih scenarija, potrebno je izvršiti njihovu evaluaciju i međusobno poređenje. Jedan od načina evaluacije razvijenih scenarija podrazumeva odabir kriterijuma i indikatora na osnovu kojih će se vršiti ocena. Kriterijumi su izabrani tako što su analizirani nedostaci trenutnog sistema i predvidele su se promene u tokovima ukoliko se implementiraju procesi kojima se ovi nedostaci planiraju ispraviti, a koji su u skladu sa ciljevima upravljanja otpadom.

Analizirani nedostaci u upravljanju biorazgradivim otpadom i definisani kriterijumi su podeljeni u dve grupe. Jedna grupa je usmerena na cilj upravljanja otpadom koji se odnosi na životnu sredinu i zdravlje ljudi, a druga je usmerena na cilj očuvanja resursa, odnosno na iskorišćenje potencija otpada kao resursa.

I Zaštita životne sredine i ljudskog zdravlja:

1. Kriterijum - Odlaganje biorazgradivog otpada bez prethodnog tretmana

Nedostatak u sistemu upravljanja otpadom predstavlja nedovoljan tretman biorazgradivog otpada kojim bi se omogućilo smanjenje uticaja na životnu sredinu ili ponovno iskorišćenje materijala.

Implementirane promene u sistemu za upravljanje biorazgradivim otpadom u okviru scenarija utiču na količinu otpada koja se odlaže na deponijama, a time i na količinu deponovanog fosfora.

Za analizu ovog problema od interesa su dva toka: biorazgradivi MSW i mulj iz PTOV, pa su analogno tome definisana dva indikatora:

- **Indikator Z1–1** – Količina biorazgradivog otpada i P koji ulazi u proces deponovanja kroz tok biorazgradivi otpad iz MSW
- **Indikator Z1–2** – Količina biorazgradivog otpada i P koji ulazi u proces deponovanja kroz tok mulj iz PTOV

2. Kriterijum – Odlaganje biorazgradivog otpada na nekontrolisanim i nesanitarnim deponijama

Trenutni sistem upravljanja otpadom nema dovoljno izgrađene kapacitete za odlaganje otpada na sanitarnim deponijama, pa se trenutno veći deo otpada odlaže na nesanitarnu uređenu ili divlje deponije.

Količina otpada koja se odlaže na ove deponije prvenstveno se smanjuje izgradnjom kapaciteta, ali i smanjenjem količine otpada kojoj je potrebno odlaganje.

Za analizu ovog problema od interesa je tok otpada koji se odlaže na nesanitarnu deponiju u okviru procesa deponovanja otpada i na osnovu koga je definisan indikator:

- **Indikator Z2** – Emisija materijala i P sa deponija prouzrokovana nesanitarnim odlaganjem otpada

3. Kriterijum – Emisije u životnu sredinu od uzgoja životinja

Iako emisije iz poljoprivredne proizvodnje nisu direktno pitanje upravljanja otpadom, već pitanje dobre poljoprivredne prakse, postupci unapređenja sistema upravljanja otpadom odražavaju se i na ove tokove. Promene implementirane u sistem za upravljanje biorazgradivim otpadom mogu uticati na smanjenje emisija. Tako, na primer, ukoliko se usvoji praksa anaerobne digestije stajnjaka, to za posledicu ima promenu u načinu sakupljanja i skladištenja ove kategorije otpada.

Za analizu ovog kriterijuma od interesa je tok otpada koji predstavlja emisiju od uzgoja životinja i na osnovu koga je definisan indikator:

- **Indikator Z3** – Emisija materijala i P iz poljoprivrede

II Očuvanje resursa:

1. Kriterijum – Potencijal biorazgradivog otpada u zalihama na deponijama

Biorazgradivi otpad se smatra i za resurs, tako da materijal koji se odlaže na deponije predstavlja neiskorišćen potencijal. Deponovanje biorazgradivog otpada predstavlja postupak kojim se onemogućava iskorišćenje nutritivnog sadržaja ovog toka. Zato upotreba ovih tokova, uz prethodni tretman ili bez njega, povećava efikasnost upravljanja fosforom kao resursom.

Za analizu ovog problema od interesa je tok otpada koji predstavlja zalihu u procesu deponovanja otpada i na osnovu koga je definisan indikator:

- **Indikator R1** – Smanjenje zaliha materijala i P na deponijama

2. Kriterijum – Upotreba nutritivnog sadržaja otpada

Kao što je već rečeno, biorazgradivi otpad se smatra i za resurs, ukoliko ispunjava propisane standarde. Ovo se prvenstveno odnosi na upotrebu ostataka nakon biološkog tretmana i upotrebu mulja.

Da bi se kompost mogao koristiti, potrebno je da se biorazgradivi otpad iz MSW posebno sakuplja i tretira kako ne bi bio kontaminiran od strane drugih kategorija otpada, kao i da sadržaj teških metala ne prelazi dozvoljene granice (Olufunke i dr., 2016).

Karakteristika mulja nakon tretmana otpadnih voda jeste da se u njemu nalaze materije koje su prvobitno bile u otpadnoj void, što se odnosi i na P. Iako je praksa u svetu da se mulj iz PTOV koristi za kondicioniranje zemljišta, to u Srbiji nije slučaj. Sa povećanjem stepena tretmana otpadnih voda, povećanjem količine produkovanog mulja, ali prvenstveno i boljom kontrolom kvaliteta, upotreba ove kategorije otpada bi bila moguća. Upotreba mulja je u EU uređena Direktivom 86/278/EEC, kojom se propisuju granične vrednosti teških metala u mulju za upotrebu u poljoprivredi (tabela 3.11).

Tabela 3.11 Granične vrednosti za koncentracije teških metala u mulju za upotrebu u poljoprivredi (86/278/EEC)

Parametar	Granična vrednost (mg/kg suve materije)
Kadmijum	20 – 40
Bakar	1.000 – 1.750
Nikal	300 – 400
Olovo	750 – 1.200
Cink	2.500 – 4.000
Živa	16 – 25
Hrom	- Komisija će naknadno odrediti granične vrednosti za hrom.

Za analizu ovog problema od interesa su dva toka: kompostirani otpad i upotrebljeni mulj iz PTOV, pa su analogno tome definisana dva indikatora:

- **Indikator R2–1** - Količina komposta i P koji se ponovo upotrebi
- **Indikator R2–2** - Količina mulja i P koji se ponovo upotrebi

3. Kriterijum – Potencijal upotrebe ostatka nakon termičkog tretmana otpada

Nekorišćenje biomase ostataka iz ratarstva za proizvodnju energije samo po sebi ne predstavlja emisiju u životnu sredinu, jer ukoliko biomasa ostane na polju, prirodno se nutritivni sadržaj biljaka reciklira. Međutim, kako ova sirovina može da se upotrebi za proizvodnju energije bez ugrožavanja održivosti poljoprivrede, ona predstavlja značajan resurs čiji bi se potencijal mogao iskoristiti.

Nakon procesa sagorevanja, sav fosfor ostaje u pepelu, gubici su vrlo mali. Kod postrojenja koja sagorevaju isključivo biomasu bez mešanja sa drugim tokovima otpada, može se razmatrati iskorišćenje pepela kao izvora za dobijanje fosfora. Takođe postoje i drugi načini korišćenja pepela: dodatak procesa kompostiranja, upotreba u voćarstvu, ali i upotreba u građevinarstvu, proizvodnji asfalta i sl. (Lamers i dr., 2018).

Za analizu ovog problema od interesa je izlazni tok nakon termičkog tretmana:

- **Indikator R3** – Potencijalni resurs iz pepela nastao spaljivanjem biorazgradivog otpada

Izračunavanjem i ocenom izabranih indikatora, omogućava se upoređivanje kako i u kojoj meri su dostignuti ciljevi upravljanja otpadom i kako oni utiču na tokove fosfora i time na mogućnost reciklaže i ponovnog iskorišćenja fosfora iz posmatranih tokova. U tabeli 3.12 prikazan je pregled analiziranih kriterijuma i izabranih indikatora, kao i sa njima povezanih tokova. Promene u upravljanju ovim tokovima uticaće na vrednost izračunatog indikatora i time omogućiti poređenje.

Tabela 3.12 Izabrani kriterijumi i indikatori za evaluaciju scenarija i povezani tokovi

Cilj zaštite životne sredine	Oznaka indikatora	Povezani procesi	Povezani tokovi
Količina otpada koja ulazi u proces deponovanje	Z1 – 1	Deponovanja otpada	Biorazgradivi iz MSW
	Z1 – 2		Mulj iz PTOV
Emisija sa deponija prouzrokovana nesanitarnim odlaganjem otpada	Z2	Nesanitarnе deponije	Otpad – nesanitarnе deponije
Emisija iz poljoprivrede	Z3	Poljoprivredni ostaci	Emisije iz uzgoja životinja
Cilj očuvanje resursa	Oznaka indikatora	Povezani procesi	Povezani tokovi
Zaliha na deponijama	R1	Sanitarne deponije	Zaliha u procesu deponovanja otpada
Količina biorazgradivog otpada koji se ponovo upotrebi	R2 – 1	Kompostiranje	Kompost
	R2 – 2	Tretman mulja	Mulj iz PTOV
Potencijalni resurs iz pepela	R3	Termički tretman	Pepeo termički tretman

4. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju su prikazani i diskutovani rezultati modelovanja trenutnog stanja sistema za upravljanje otpadom i dva alternativna scenarija. Rezultati su prikazani za ukupne masene tokove i za tokove fosfora u okviru njih. Nakon toga je izvršena evaluacija i poređenje dobijenih rezultata.

4.1 REZULTATI ANALIZE TRENUTNOG STANJA SISTEMA UPRAVLJANJA BIORAZGRADIVIM OTPADOM¹

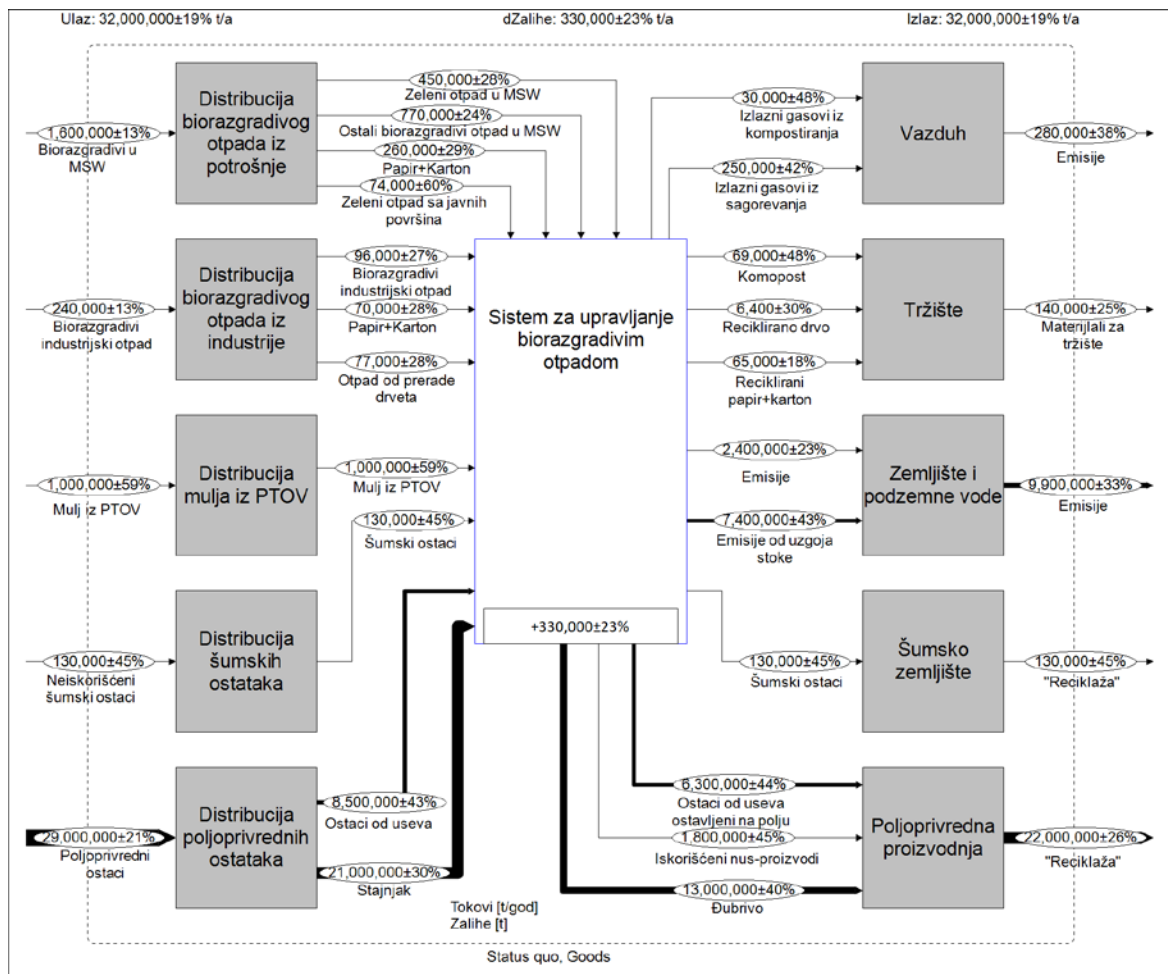
4.1.1 Trenutno stanje sistema – tokovi biorazgradivog otpada

Ukupna količina materijala koji ulazi u sistem upravljanja biorazgradivim otpadom iznosi 32.000.000 t·god⁻¹, od toga: biorazgradivi MSW 1.600.000 tona godišnje, biorazgradivi industrijski 240.000 t·god⁻¹, mulj iz PTOV 1.000.000 t·god⁻¹, neiskorišćena šumska biomasa 130.000 t·god⁻¹ i ostaci iz poljoprivrede 29.000.000 t·god⁻¹.

Materijali koji izlaze iz sistema predstavljaju: emisiju u vazduh 280.000 t·god⁻¹, materijal koji potencijalno ima tržišnu vrednost 72.000 t·god⁻¹, tok u zemljište i podzemne vode 9.900.000 t·god⁻¹, šumska neiskorišćena biomasa 130.000 t·god⁻¹ i materijal koji se „reciklira“ u okviru poljoprivrede 22.000.000 t·god⁻¹. Ukupno povećanje zalihe sistema iznosi 300.000 t·god⁻¹. Termin reciklaža je dat pod znacima navoda jer ne podrazumeva da se svi tokovi recikliraju antropogenim delovanjem, već se deo toka prirodno vraća u ciklus kruženja materije, kao što je npr. šumska biomasa ostavljena u šumi.

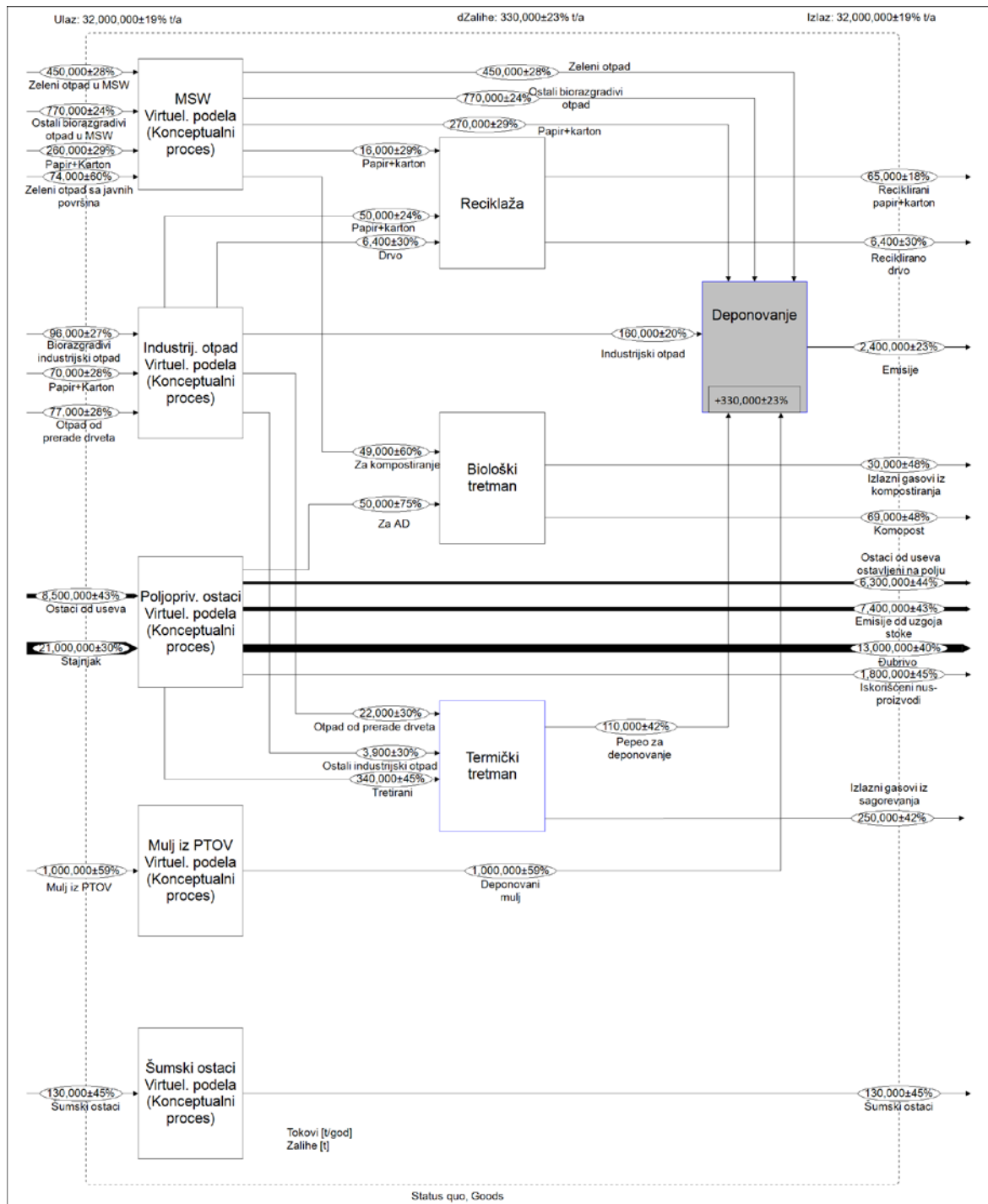
Rezultati MFA modelovanja tokova biorazgradivog otpada (vlažna materija) prikazani su na graficima 4.1 i 4.2.

¹ Rezultati prikazani u ovom poglavlju su 2020. godine objavljeni u radu “Biodegradable waste management in Serbia and its implication on P flows” autora Vujovic, S., Stanisavljevic, N., Fellner, J., Tomic, N. i Lederer, J., u časopisu “Resources, Conservation and Recycling” kategorije M21A sa IF 8.086.



Grafik 4.1 MFA generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji; podaci dati u t·god⁻¹

Na grafiku 4.2 prikazan je detaljan podsistem upravljanja biorazgradivim otpadom, koji uključuje procese tretmana i odlaganja otpada. Biološkim tretmanom se ukupno tretira 99.000 t·god⁻¹ materijala, termičkim tretmanom 366.000 t·god⁻¹, na reciklažu odlazi 72.000 t·god⁻¹, dok u podsistem odlaganja otpada odlazi 2.800.000 t·god⁻¹.



Grafik 4.2 MFA podsistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.2); podaci dati u t·god⁻¹

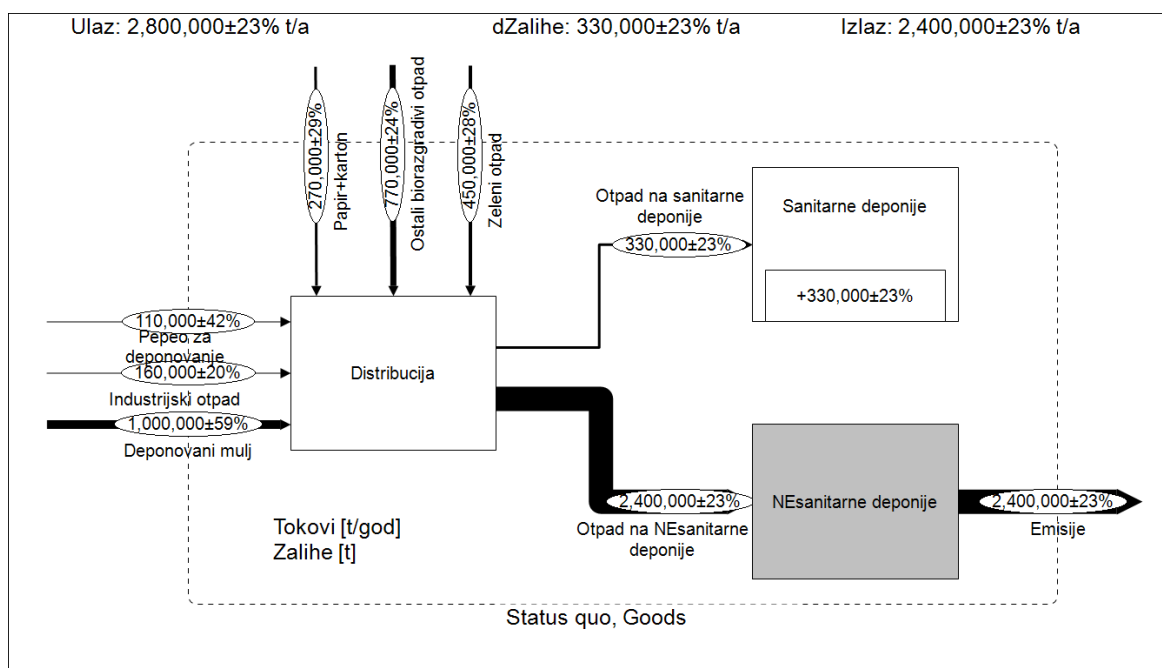
Najznačajniji tok biorazgradivog otpada predstavljaju poljoprivredni ostaci, koji čine više od 90% ukupnih biorazgradivih tokova (stajnjak dominira). Analiza pokazuje da se samo 65% stajnjaka na odgovarajući način koristi kao đubrivo (na grafiku 4.2., vrednost toka je 13.000.000 t·god⁻¹). Neiskorišćeni potencijal ostataka od useva (6.300.000 t·god⁻¹)

predstavlja 20% ukupnih ostataka iz poljoprivrede ili 70% ukupnih ostataka od useva. Preostali ostaci useva su tokovi „korišćeni nusproizvod“ ($1.800.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$) i „tretirani“ poljoprivredni ostaci ($340.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$). Prvi tok se uglavnom koristi kao prostirka za životinje i obično se meša sa stajskim đubrivom, a zatim se primenjuje u „poljoprivrednoj proizvodnji“. Drugi tok se koristi kao biomasa za proizvodnju energije u „termičkom tretmanu“.

Drugi najvažniji tok biorazgradivog otpada u Srbiji predstavlja biorazgradivi otpad prisutan u čvrstom komunalnom otpadu. Samo 3% ove kategorije se kompostira ($49.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$), a samo 1% se reciklira kao papir i karton ($16.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$). Ostatak se odlaže na deponije ($1.490.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$) (grafik 4.3). Od industrijskog biorazgradivog otpada, samo 60% se odlaže na deponije ($160.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$) zbog odgovornosti industrijskog sektora za upravljanje sopstvenim otpadom.

Mulj nastao prečišćavanjem otpadnih voda takođe je značajan tok i trenutno se godišnje generiše oko 140 kg vlažnog mulja po stanovniku. Pored toga, očekuje se da će se u budućnosti povećati količina otpadne vode koja će se tretirati (SGRS 2017), što će rezultirati povećanjem količine mulja. Ukupna količina ostataka od seče drveća u šumama procenjuje se na 1,1 milion m^3 . Međutim, jedan deo šumskog otpada već se koristi u različite svrhe (Energy Saving Group, 2007), tako da neiskorišteni šumski ostaci iznose do 130.000 tona godišnje ($= 18 \text{ kg}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$).

U Srbiji odlaganje otpada predstavlja pretežno rešenje za otpad, ali u većini slučajeva je neadekvatno zbog nedostatka odgovarajućih tehničkih barijera i rada lokacije (Stanisavljević i dr., 2015; Mikić i Naunović, 2013). U ovoj studiji, ovakve deponije i otpad koji se odlaže na njima smatraju se delom životne sredine. Zbog toga se odlagani materijal ne smatra zalihom u sistemu upravljanja otpadom (grafik 4.3). To je razlog zašto zalihe biorazgradivog otpada u sistemu nisu tako visoke kao što se očekuje, kada je deponovanje dominantan tretman otpada.



Grafik 4.3 MFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u t·god⁻¹

Najveći „gubici“ biorazgradivog otpada isto se javljaju u poljoprivrednom sektoru. Analiza je pokazala da 35% stajnjaka (posebno tečne faze) završi u okolini. To je posledica tradicionalnog sistema držanja stoke i malih gazdinstava, gde se na otvorenom prostoru sakuplja i skladišti samo čvrsto stajsko đubrivo (RZS, 2013).

Dostupni podaci naglašavaju potrebu za poboljšanjem upravljanja stajnjakom (ARCOTRASS, 2006; Cooper i dr., 2010; Cvetković i dr., 2014; SGRS, 2014; IPARD II, 2019). Ozbiljne probleme prouzrokuju farme svinja, gde se stajnjak skladišti u velikim lagunama sa velikim rizikom od zagađenja površinskih i podzemnih voda (ARCOTRASS, 2006; Cooper i dr., 2010). Dodatni problemi nastaju usled tendencije malih poljoprivrednih gazdinstava da dugotrajno skladište stajnjak direktno na tlu bez vodootpornih barijera, pre njegove primene na njivama. Ovakvo upravljanje ima direktan uticaj na kvalitet podzemnih voda difuznim zagađenjem (IPARD II, 2019). Pored toga, zbog tradicionalne poljoprivredne prakse, stajnjak ovaca i koza je teško sakupljati (Cvetković i dr., 2014). Ovaj tok se ne smatra nužno emisijom u okolinu, već više izgubljenim potencijalom.

Čvrsti stajnjak je veoma vredno đubrivo, međutim upotreba tečnog stajnjaka nije efikasna, posebno svinjskog (čak i u slučajevima kada se adekvatno sakuplja). To je indukovano i popisom poljoprivrednih mašina, gde ne postoji mehanizacija za transport i primenu tečnog stajnjaka, ne postoji ili je neispravna (RZS, 2013; Cooper i dr., 2010). Tečni stajnjak, koji predstavlja 4% generisanog stajnjaka, rezultira direktnim emisijama u životnu sredinu zbog neadekvatnog upravljanja i skladištenja u vodopropusnim i prelivnim skladištima stajnjaka i lagunama.

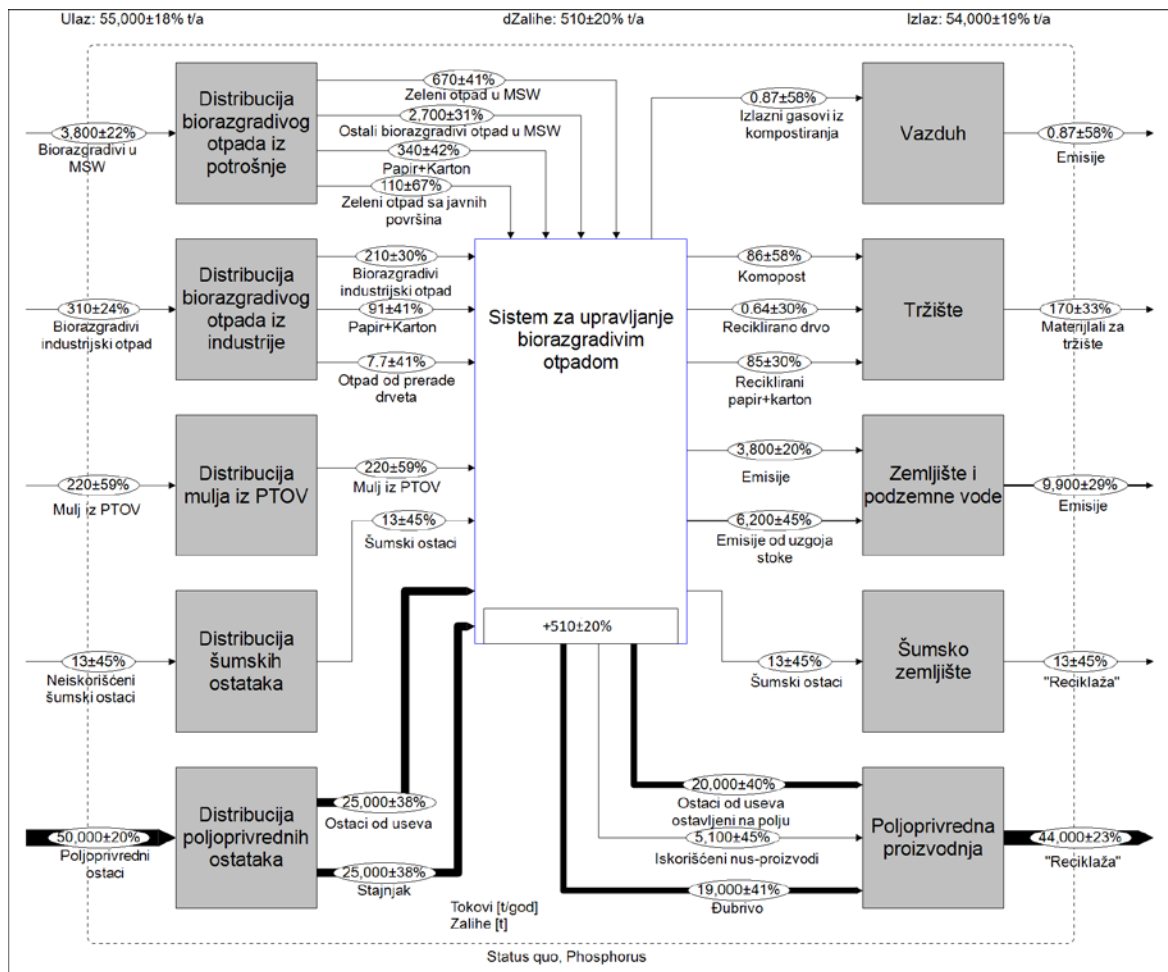
Neiskorišćena biomasa koja se ostavlja na polju, a koja bi se mogla prikupiti bez ugrožavanja poljoprivredne proizvodnje, razmatra se samo kao alternativni izvor energije sa najvećim energetske potencijalom u Srbiji (SGRS, 2015). Biorazgradivi komunalni otpad predstavlja samo 7% ukupnih dobara u razmatranom sistemu, ali 88% ovog otpada završi na nekontrolisanim lokacijama za odlaganje, bez ikakvog sistema zaštite životne sredine.

4.1.2 Trenutno stanje sistema – tokovi fosfora

Ukupna količina P koji ulazi u sistem upravljanja biorazgradivim otpadom iznosi 55.000 t P·god⁻¹, od toga: biorazgradivi MSW 3.800 t P·god⁻¹, biorazgradivi industrijski 310 t P·god⁻¹, mulj iz PTOV 220 t P·god⁻¹, neiskorišćena šumska biomasa 13 t P·god⁻¹ i ostaci iz poljoprivrede 50.000 t P·god⁻¹.

Materijali koji izlaze iz sistema predstavljaju: emisiju u vazduh 0,8 t P·god⁻¹, materijal koji potencijalno ima tržišnu vrednost 85 t·god⁻¹, tok u zemljište i podzemne vode 10.000 t P·god⁻¹, šumska neiskorišćena biomasa 13 t P·god⁻¹, i materijal koji se „reciklira“ u okviru poljoprivrede 44.000 t P·god⁻¹. Ukupno povećanje zalihe sistema iznosi 510 t P·god⁻¹.

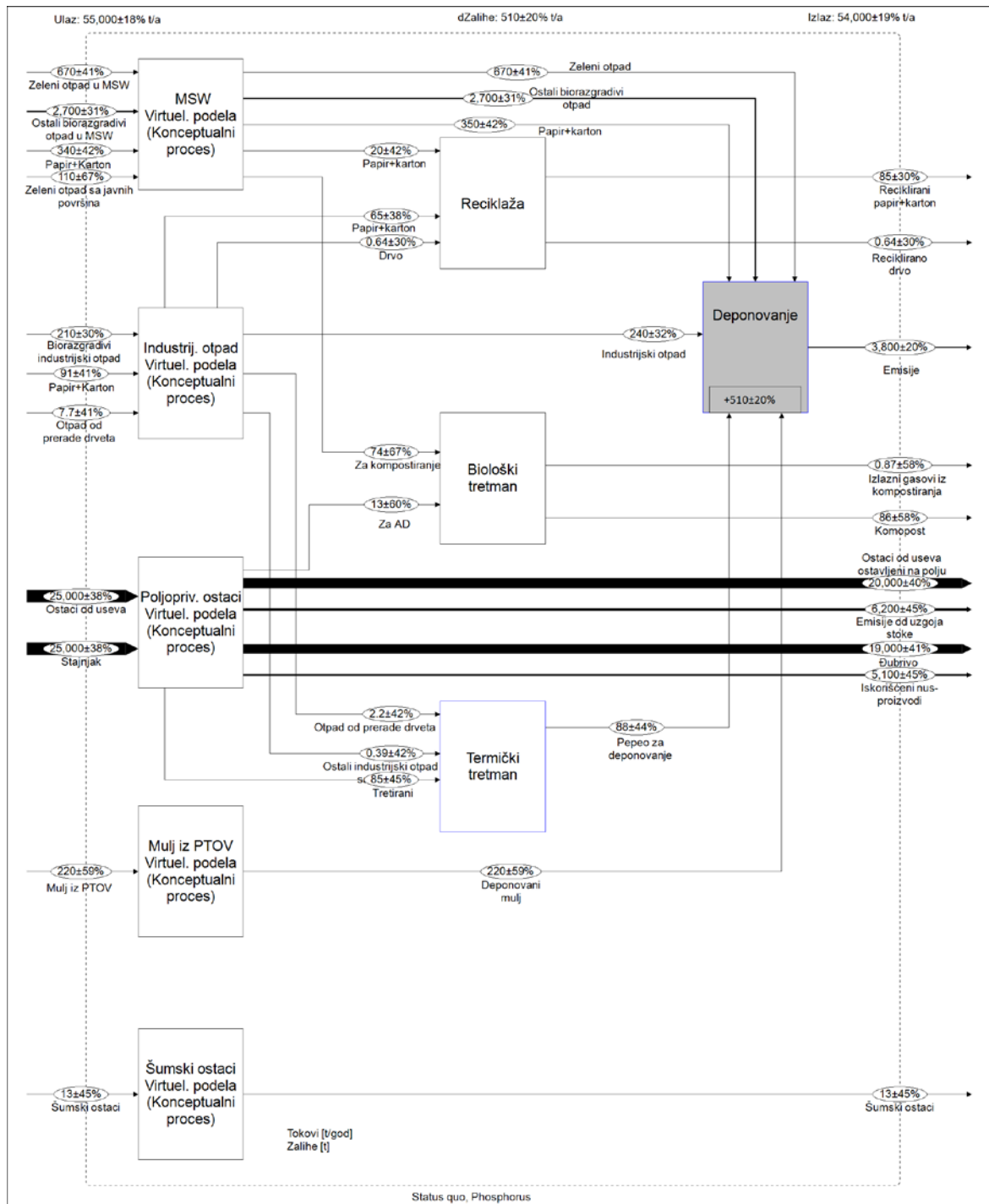
Rezultati SFA za fosfor u tokovima biorazgradivog otpada prikazani su na graficima 4.4 i 4.5.



Napomena: Višak P ispran u zemlju ili površinske vode iz poljoprivredne proizvodnje nisu uzeti u obzir tokom istraživanja.

Grafik 4.4 SFA fosfora u Srbiji; podaci dati u t P-god⁻¹

Na grafiku 4.5 prikazani su procesi tretmana i odlaganja otpada u okviru podsistema upravljanja biorazgradivim otpadom. Biološkim tretmanom se ukupno tretira 87 t·god⁻¹ fosfora, termičkim tretmanom 88 t P·god⁻¹, na reciklažu odlazi 86 t P·god⁻¹, dok u podsystem odlaganja otpada odlazi 4.300 t P·god⁻¹.



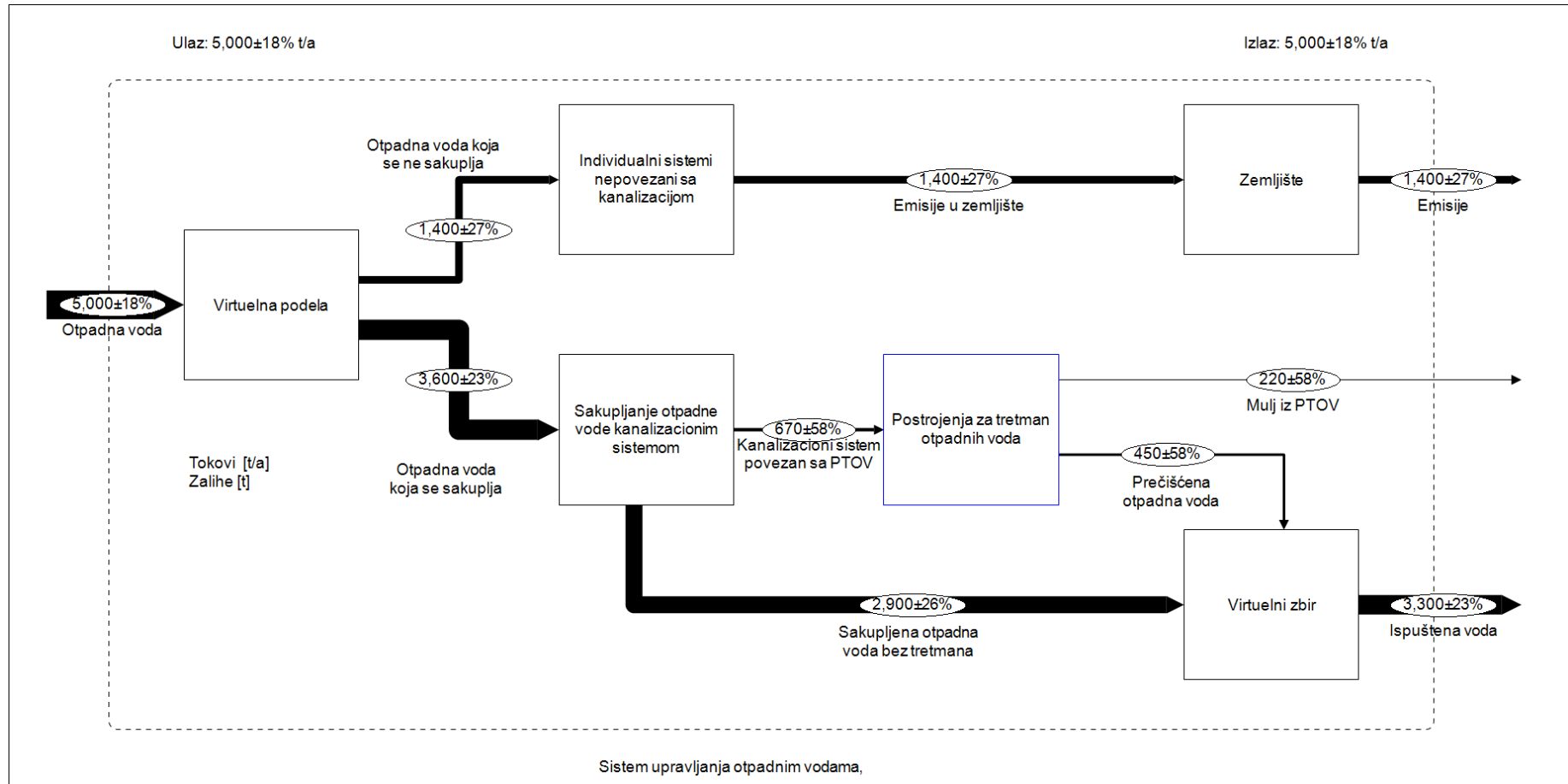
Grafik 4.5 SFA fosfora sistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsystem procesa predstavljen na grafiku 4.4); podaci dati u t P·god⁻¹

Slična situacija kao što je bila na nivou tokova biorazgradivog otpada jeste i na nivou P, gde je najznačajniji P tok prisutan u poljoprivrednim ostacima. Trenutno, najveći gubici P (0,86 kg P·st⁻¹·god⁻¹) javljaju se u poljoprivredi, uglavnom zbog vrlo lošeg

upravljanja životnom sredinom na postojećim farmama. To je u skladu sa podacima Cooper i dr., 2010. godine, gde je Srbija prepoznata kao jedna od zemalja koja najviše doprinosi emisiji fosfora u Dunav, delom i zbog zagađenja sa stočnih farmi. Upoređujući rezultate sa sličnim studijama za druge evropske zemlje (poput Austrije ili Danske), može se videti da su u ovim zemljama emisije fosfora iz poljoprivrede značajno niže ili čak i ne postoje. U Danskoj u poljoprivednom sektoru samo su emisije od $0,07\text{--}0,22 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$ povezane sa emisijama tokom ispiranja i erozije zemljišta (Klinglmair i dr., 2015). Emisije P u vezi sa stočarstvom uopšte ne postoje. Slična situacija je zapažena i u Austriji, gde je samo emisija prouzrokovana erozijom, u količini od $2,2 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$, povezana sa gubicima fosfora iz uzgoja useva (Egle i dr., 2014). Svakako treba napomenuti da je poljoprivredni sektor u Srbiji mnogo značajniji nego u Austriji u pogledu ukupnog toka P (Zoboli i dr., 2015). Međutim, Srbija nije jedina zemlja u kojoj postoji ta emisija. U Kini sa stočarskih farmi $0,5 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$ ispušta se u površinske (Liu i dr., 2004; Li i dr., 2020).

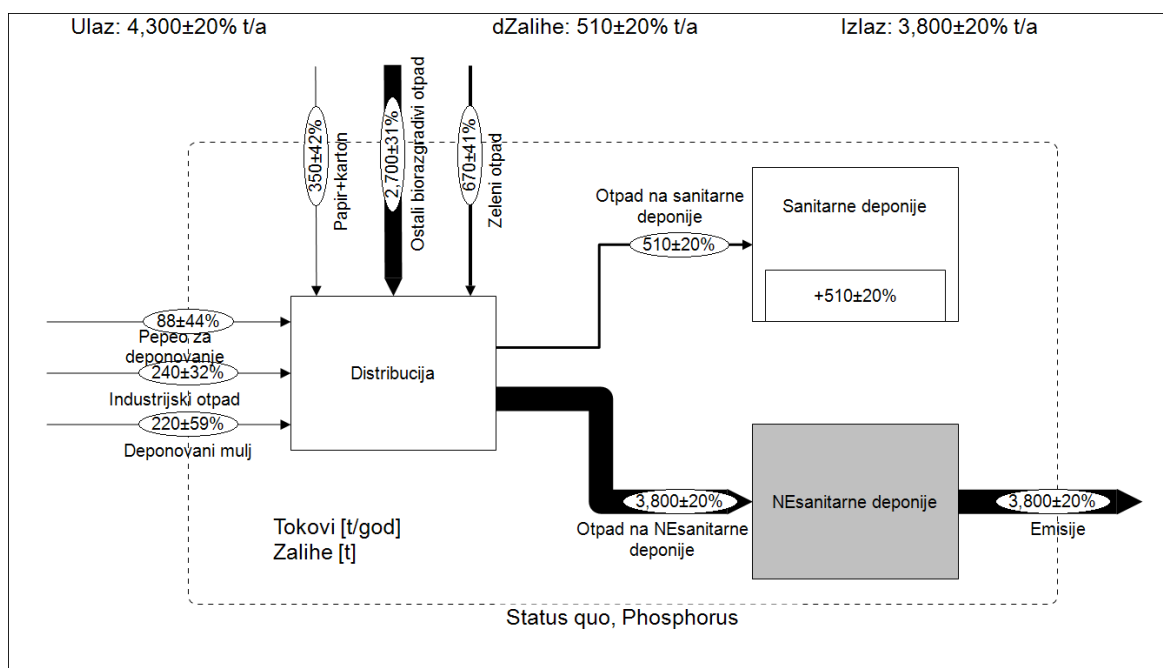
P prisutan u komunalnom otpadu skoro nimalo se ne reciklira. U Srbiji kompostiranje biološkog otpada prisutnog u komunalnom otpadu doprinosi obnavljanju P od svega $0,01 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$. Ovo je zanemarljiva vrednost, za razliku od Austrije, gde se kroz odvojeno prikupljen komunalni i industrijski biorazgradivi otpad ponovo upotrebi $0,42 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$ (Egle i dr., 2014), dok se u Danskoj koristi $0,08 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$ poreklom od sličnih tokova (Klinglmair i dr., 2015).

U mulju iz PTOV prisutno je jako malo fosfora, ukupno oko 220 tona ili $0,03 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$. Ovo je posledica dominantno zastupljenog primarnog i sekundarnog tretmana otpadne vode (ICPDR, 2009), koji se uglavnom koristi u Srbiji, kao što je prikazano na grafiku 4.6.



Grafik 4.6 Upravljanje otpadnim vodama u Srbiji – tokovi P; podaci dati u t P·god⁻¹

Kao i u slučaju biorazgradivog otpada, postoje razlike u procesu odlaganja na deponije u poređenju s drugim dostupnim studijama (Seyhan, 2006; Egle i dr., 2014; Senthilkumar i dr., 2014; Klinglmair i dr., 2015). Zbog nedostatka odgovarajućih tehničkih barijera, deponovanje takođe rezultira emisijama fosfora u životnu sredinu (N'Goran i dr., 2019). Iz razloga što se u ovom istraživanju nesanitarna odlagališta smatraju delom životne sredine, deponovani fosfor na takvim deponijama ne smatra se zalihom u sistemu (grafik 4.7).



Grafik 4.7 SFA podsystema deponovanja otpada; podaci dati u t P·god⁻¹

Za postizanje izdvajanja fosfora i ponovnu upotrebu iz bilo koje vrste otpada – nema jedinstvenog rešenja. Dostupne tehnike za izdvajanje i ponovnu upotrebu fosfora mogu biti u rasponu od niskotehnoloških rešenja malih razmera, poput direktne ponovne upotrebe stajskog đubriva, do velikih razmera, visokotehnoloških rešenja, kao što je izdvajanje P iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda ili pepela nakon sagorevanja biomase (Cordell i dr., 2011).

Đubrivo se tradicionalno primenjuje na poljoprivrednom zemljištu u cilju zatvaranje ciklusa nutrijenata. P iz biorazgradivog MSV-a može se iskoristiti na više načina. Jedna od mogućnosti je biološki tretman, bilo aerobni ili anaerobni (Stanisavljevic i dr., 2015). Kao krajnji rezultat tretmana nastaje kompost, koji se može koristiti kao đubrivo, zavisno od kvaliteta krajnjeg proizvoda (Barrena i dr., 2014). Šumski otpad i deo poljoprivrednog otpada prvenstveno se mogu koristiti kao alternativno gorivo za proizvodnju energije.

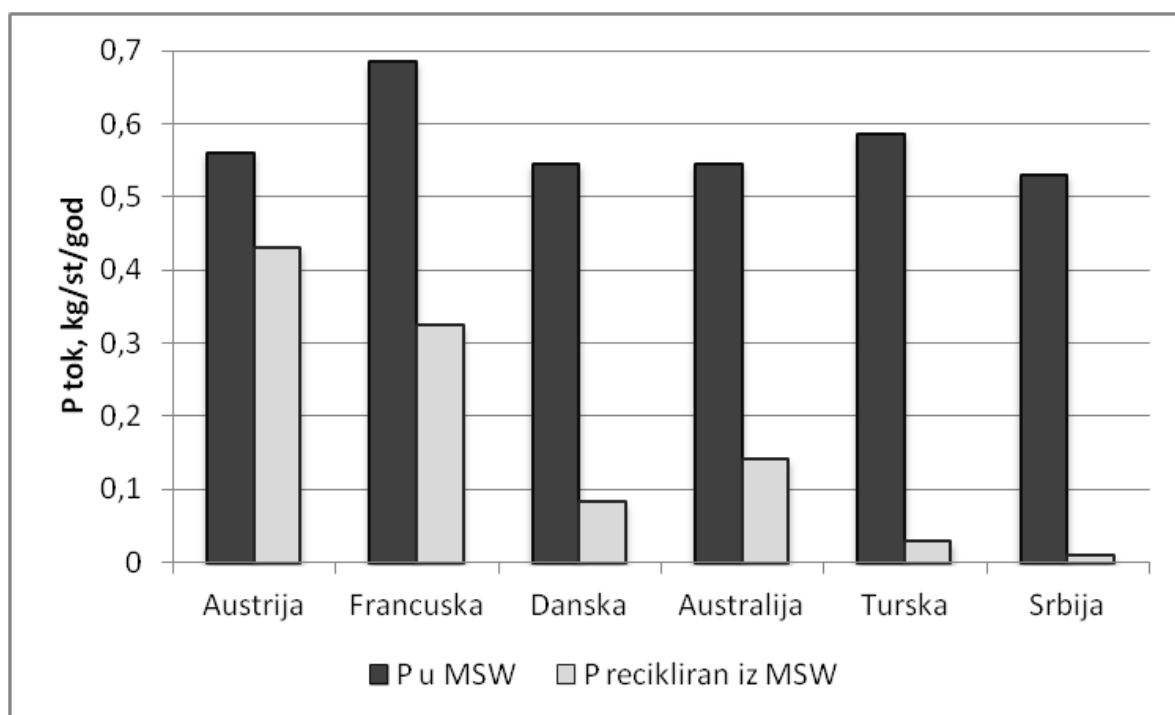
Nakon sagorevanja, glavni deo fosfora se zadržava u pepelu, iz koga se može izdvojiti naknadno (Tan & Lagerkvist, 2011; Kalmykova & Fedje, 2013).

Količina mulja iz tretmana otpadnih voda ubuduće će se povećavati. To će direktno uticati na povećanje potencijalno dostupnog P za dalje upravljanje. Pod uslovom da se primeni terciarni tretman, 90% P koji se nalazi u otpadnoj vodi može da se sakupi i koncentriše u mulju iz otpadnih voda i nakon odgovarajućeg tretmana primeni u zemljište kao đubrivo. Uz ovaj nivo prečišćavanja prikupljenih otpadnih voda, ukupni potencijal P za ponovnu upotrebu iz otpadne vode bio bi 3.200 tona godišnje ($0,5 \text{ kg} \cdot \text{st}^{-1} \cdot \text{god}^{-1}$).

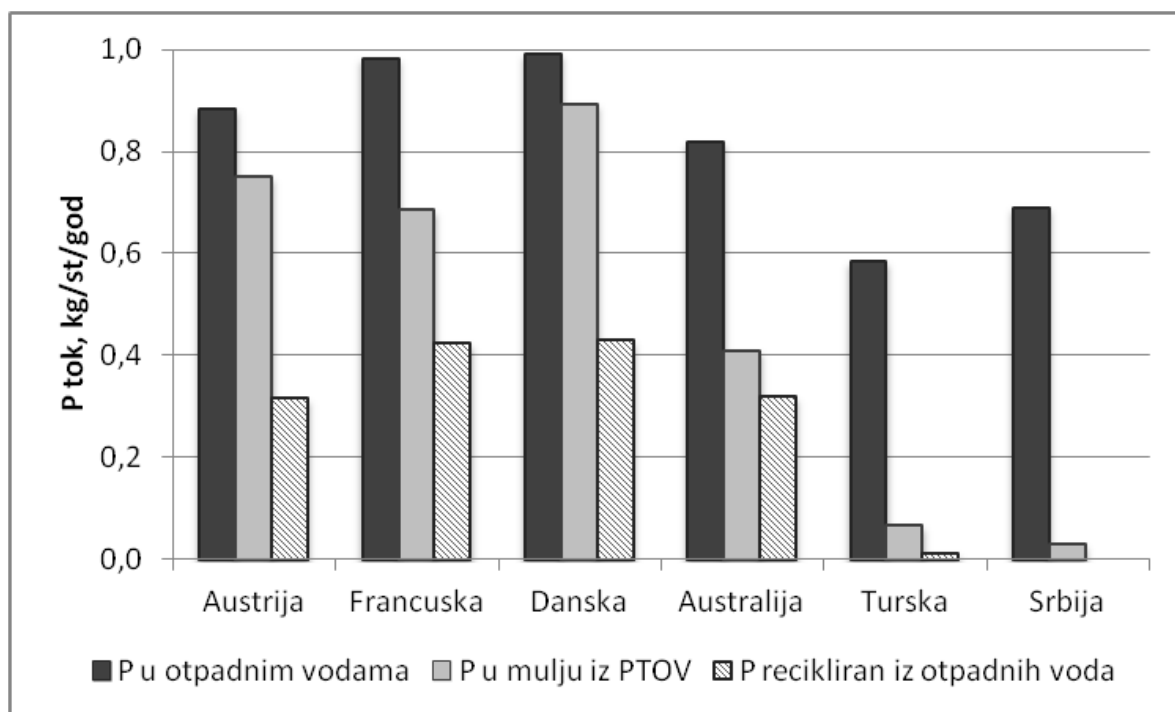
U Srbiji se P iz mulja od otpadnih voda trenutno ne koristi ni na jedan način kao što je to slučaj u mnogim državama članicama EU. Na primer, u Danskoj se 50–75% P iz otpadnih voda koristi u poljoprivredi (Klinglmair i dr., 2015), u Francuskoj 62,9% (Senthilkumar i dr., 2014), a u Austriji 40% (Egle i dr., 2014). Razlozi zbog kojih se P iz mulja u Srbiji ne reciklira identifikovani su kao: 1. većina generisanih otpadnih voda se ne tretira zbog nepostojanja odgovarajuće tehničke infrastrukture, stoga se ne stvaraju značajne količine mulja; 2. nedostatak zakona o upotrebi mulja iz otpadnih voda u poljoprivredi koji bi regulisao ovu oblast primene (Iako Zakon o upravljanju vodama ostavlja mogućnost korišćenja mulja iz PPOV u poljoprivredi, ovo pitanje nije dalje regulisano podzakonskim aktima ili drugim zakonima, kao što su Zakon o poljoprivrednom zemljištu i Zakon o upravljanju otpadom.); 3. nedostatak dobre prakse, tehnologije; 4. ekonomski razlog (Vujovic i dr., 2020). Sadašnja praksa odlaganja mulja na kontrolisanim odlagalištima zahteva manje troškova u odnosu na odlaganje na sanitarnim odlagalištima (Vujic i dr., 2017).

Da bi se prikazao nivo recikliranja P u Srbiji, izvršeno je upoređivanje sa stanjem u različitim zemljama. Na grafiku 4.8 prikazano je poređenje količine izdvojenog P iz biorazgradivog komunalnog otpada. Ukupna količina P po stanovniku u biorazgradivom otpadu iz MSW u Srbiji slična je kao i u ostali zemljama za koje je izvršeno poređenje. Međutim, količina recikliranog P iz ovog toka varira i najveća je u Austriji (77%), dok je ubedljivo najniža u Srbiji (2%).

Na grafiku 4.9 prikazano je poređenje količine izdvojenog P iz otpadnih voda. Ukupna količina P koji se nalazi u otpadnoj vodi je nešto niža u Turskoj i Srbiji nego u ostalim zemljama, dok je količina P koji se izdvaja u mulju iz PTOV višestruko niža (11% i 4%). Količina P koja se reciklira iz mulja u Srbiji je 0%, a u Turskoj je skoro zanemarljiva – 2%. Ova količina u ostalim zemljama se kreće 36–43% P koji se nalazi u otpadnim vodama.



Grafik 4.8 Nivoi izdvajanja P u različitim zemljama iz biorazgradivog otpada u MSW-u; podaci su dati u kg P po stanovniku po godini (Vujovic i dr., 2020. na osnovu: Egle i dr., 2014; Senthilkumar i dr., 2012; Klinglmair i dr., 2015; Biswas Chowdhury i dr., 2018; Seyhan 2006)



Grafik 4.9 Nivoi izdvajanja P u različitim zemljama iz otpadnih voda; podaci su dati u kg P po stanovniku po godini (Vujovic i dr., 2020. na osnovu: Egle i dr., 2014; Senthilkumar i dr., 2012; Klinglmair i dr., 2015; Biswas Chowdhury i dr., 2018; Seyhan 2006)

Emisija i gubici P sa stočarskih farmi predstavljaju najveće gubitke u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom, sa najvećim potencijalom za ponovnu upotrebu. Primena odgovarajuće poljoprivredne prakse u kojoj se stajnjak sigurno skladišti kako bi se sprečila kontaminacija okoline može se posmatrati kao jednostavno rešenje. Međutim, kako je u Srbiji registrovano više od dva miliona stočnih gazdinstava (većinom su to mala gazdinstva), primena, kontrola i nadzor ovih mera su neophodni. Iskorišćenje P iz ostataka useva smatra se specifičnim problemom, jer se za sada taj tok ne smatra emisijom. Ako se biomasa sagoreva kao alternativno gorivo, P treba i može da se dobije iz pepela koji se generiše kao produkt sagorevanja. U slučaju mono-insineratora u kojoj bi sagorevala isključivo biomasa, pepeo bi čak mogao biti direktno korišćen kao đubrivo (Lamers i dr., 2018.). To se ne odnosi na pepeo iz insineratora gde se sagoreva mulj od otpadnih voda, jer sadržaj teških metala ograničava njegovu upotrebu. Ovaj pepeo bi se mogao koristiti kao sirovina u proizvodnji P đubriva.

Trenutno 4% količine P iz otpadnih voda završava u mulju iz PTOV, stoga je nivo povrata/tretmana P veoma nizak. Da bi se situacija poboljšala, neophodna su kapitalna ulaganja u sistem za prečišćavanje otpadnih voda, kao i tretman mulja, što je osnova za efikasniji povrat P, ali i za smanjenje velike emisije P. Upravljanje MSW-om takođe zahteva velika ulaganja. Da bi se sprečile emisije P iz otpada u životnu sredinu, neophodno je prvenstveno da sve deponije budu sanitarne deponije. Pored toga, da bi se omogućio povrat P iz ovog toka otpada, potrebno je uvesti odvojeno sakupljanje biootpada, praćeno odgovarajućim sistemima za tretman.

Dosadašnja analiza pokazala je da je potrebno izvršiti izmene u sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom u Srbiji da bi se efikasnije upravljalo P tokovima.

4.2 PRIKAZ REZULTATA RAZVIJENIH SCENARIJA

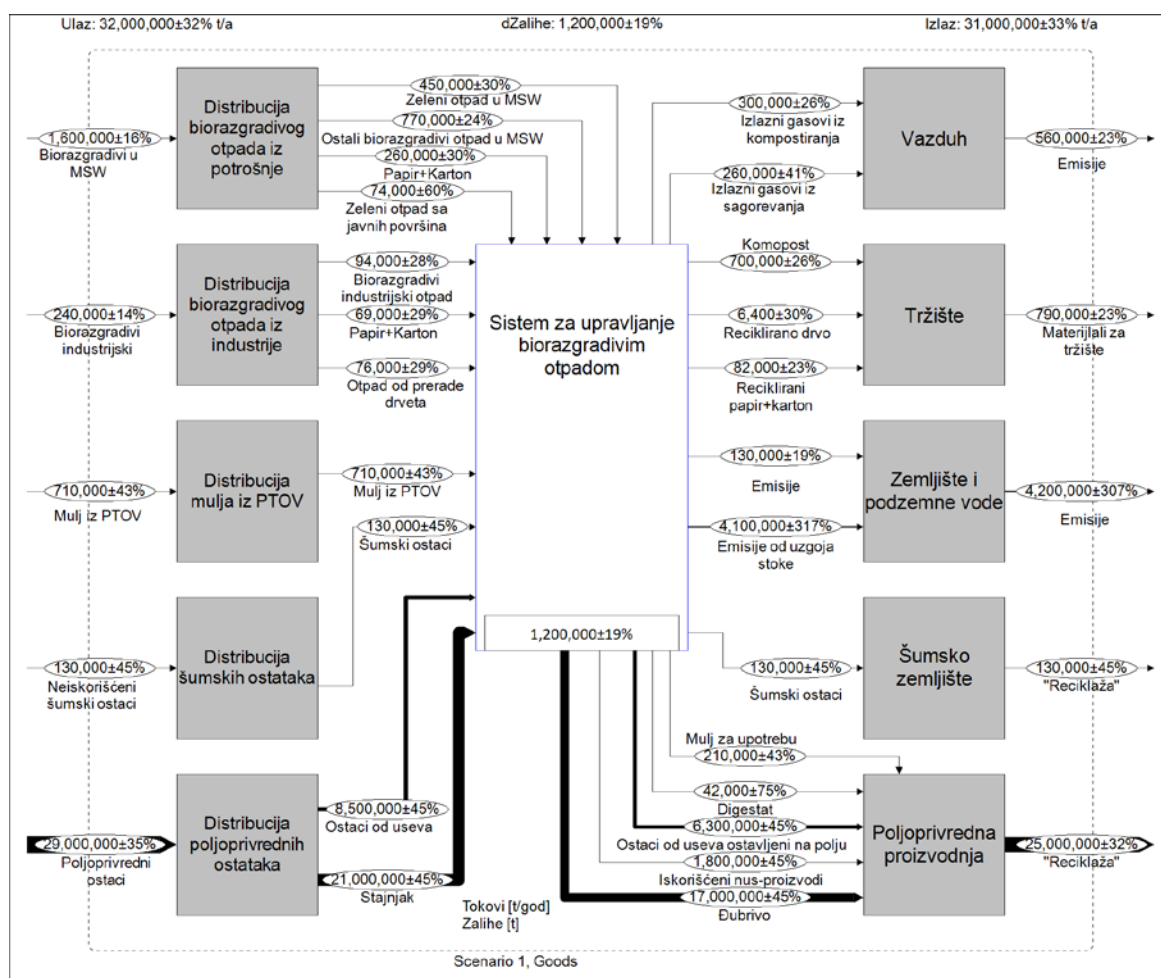
U ovom poglavlju su prikazani rezultati modelovanja alternativnih scenarija. Prikazani su rezultati za oba scenarija na nivou dobara i na nivou supstanci kako bi se mogao sagledati uticaj implementiranih promena na upravljanje fosforom.

4.2.1 Scenario 1 – tokovi biorazgradivog otpada

Ukupna količina materijala koji ulazi u sistem upravljanja biorazgradivim otpadom nije se menjala u odnosu na trenutno stanje, osim u slučaju generisane količine mulja iz PTOV, koja iznosi $710.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$. Ostali tokovi iznose: biorazgradivi MSW $1.600.000$ tona godišnje, biorazgradivi industrijski $240.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$, neiskorišćena šumska biomasa $130.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$ i ostaci iz poljoprivrede $29.000.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$.

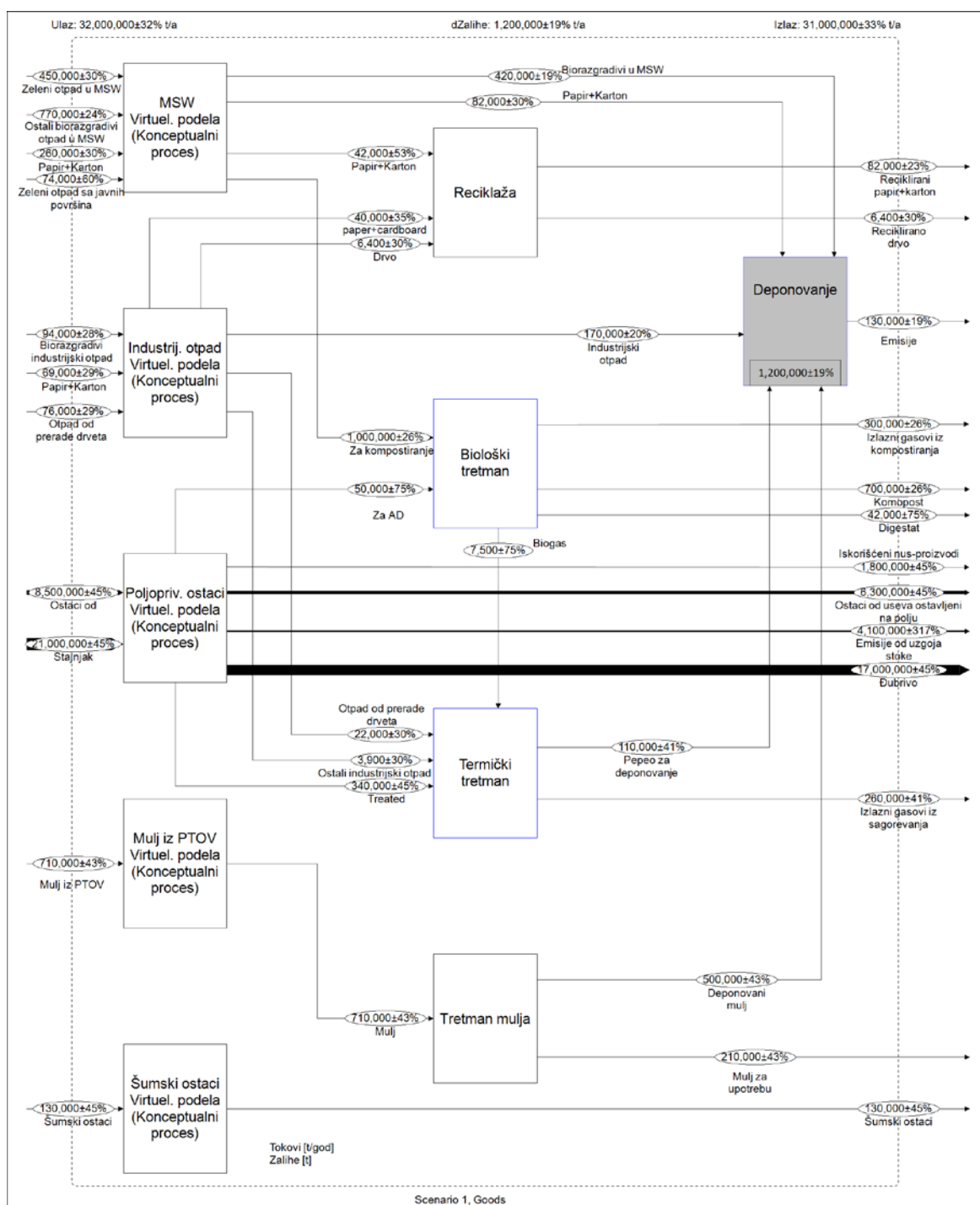
Materijali koji izlaze iz sistema predstavljaju emisiju u vazduh 560.000 t·god⁻¹, materijal koji potencijalno ima tržišnu vrednost 790.000 t·god⁻¹, tok u zemljište i podzemne vode 4.200.000 t·god⁻¹, šumska neiskorišćena biomasa 130.000 t·god⁻¹ i materijal koji se „reciklira“ u okviru poljoprivrede 25.000.000 t·god⁻¹. Ukupno povećanje zalihe sistema iznosi 1.200.000 t·god⁻¹.

Rezultati MFA tokova biorazgradivog otpada u scenariju očuvanja resursa prikazani su na graficima 4.10 i 4.11.



Grafik 4.10 Scenario 1 – MFA generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji; podaci dati u t·god⁻¹

Kako je prikazano na grafiku 4.11, biološkim tretmanom se ukupno tretira 1.020.000 t·god⁻¹ materijala, termičkim tretmanom 366.000 t·god⁻¹, na reciklažu odlazi 88.000 t·god⁻¹, dok u podsistem odlaganja otpada odlazi 1.300.000 t·god⁻¹.



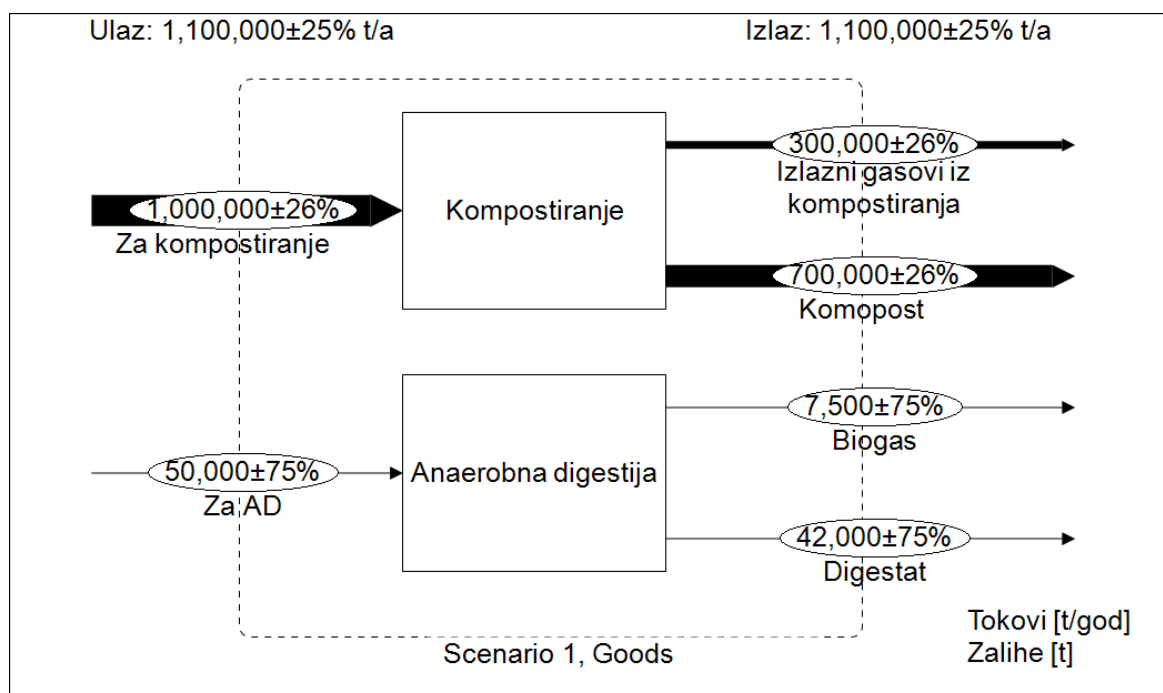
Grafik 4.11 Scenario 1 – MFA podсистema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsystem procesa predstavljen na grafiku 4.10); podaci dati u t-god⁻¹

Najznačajniji tok biorazgradivog otpada i dalje predstavljaju poljoprivredni ostaci. Količina stajnjaka koji adekvatno može da se iskoristi kao đubrivo povećala se na preko 80% (na grafiku 4.11 vrednost toka je 17.000.000 t-god⁻¹). Količina neiskorišćenog potencijala

ostataka od useva je ostala ista ($6.300.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$) i dalje predstavlja 20% ukupnih ostataka iz poljoprivrede ili 70% ukupnih ostataka od useva.

Drugi najvažniji tok u scenarijima predstavlja mulj iz PTOV. Količina mulja se naizgled smanjila ako uporedimo sa količinom iz trenutnog stanja. Ovo je posledica očekivanog povećanja suve materije u mulju. Ako se izvrši poređenje količina sa istim udelom suve materije, onda se masa ovog toka uvećala čak sedam puta usled promena koje se očekuju u sistemu upravljanja otpadnim vodama. Kako je upotreba mulja kao đubriva različito zastupljena od zemlje do zemlje, teško je predvideti kolika se količina ovog toka može iskoristiti u Srbiji, pogotovo što njegovo korišćenje direktno zavisi od kvaliteta mulja. Takođe, iako u ovom istraživanju nisu razmatrane dodatne opcije upravljanja muljem koji se ne može upotrebiti, mogu se primeniti i drugi tretmani, kao što je insineracija, kako bi se ova količina materijala smanjila.

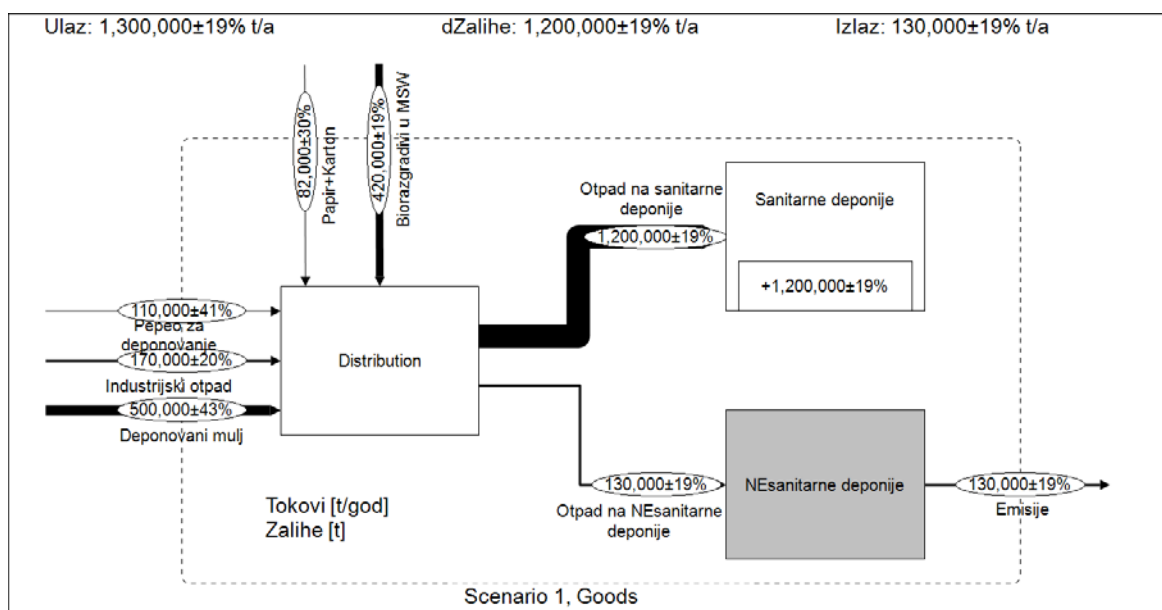
Što se tiče biorazgradivog otpada u Srbiji, u ovom scenariju je predviđeno značajno povećanje količine otpada koji se kompostira – na 65% od ove kategorije otpada ($970.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$) (grafik 4.12). Količina papira i kartona koji se reciklira povećani su tri puta ($42.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$). Ostatak koji se odlaže na deponije iznosi $502.000 \text{ t}\cdot\text{god}^{-1}$.



Grafik 4.12 Scenario 1 – MFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u $\text{t}\cdot\text{god}^{-1}$

Takođe, i u okviru procesa deponija u ovom scenariju je došlo do značajnih promena. Smanjena je ukupna količina otpada koji ulazi u proces deponovanje ($1.300.000$

t·god⁻¹) jer je veliki deo otpada preusmeren sa deponija. Kako je povećana i količina otpada koja se odlaže na sanitarne deponije (na 90%), povećala se i količina otpada koja se smatra zaliha sistema, a samim tim smanjila se ukupna emisija iz ovog podsistema na 130.000 t·god⁻¹ (grafik 4.13).



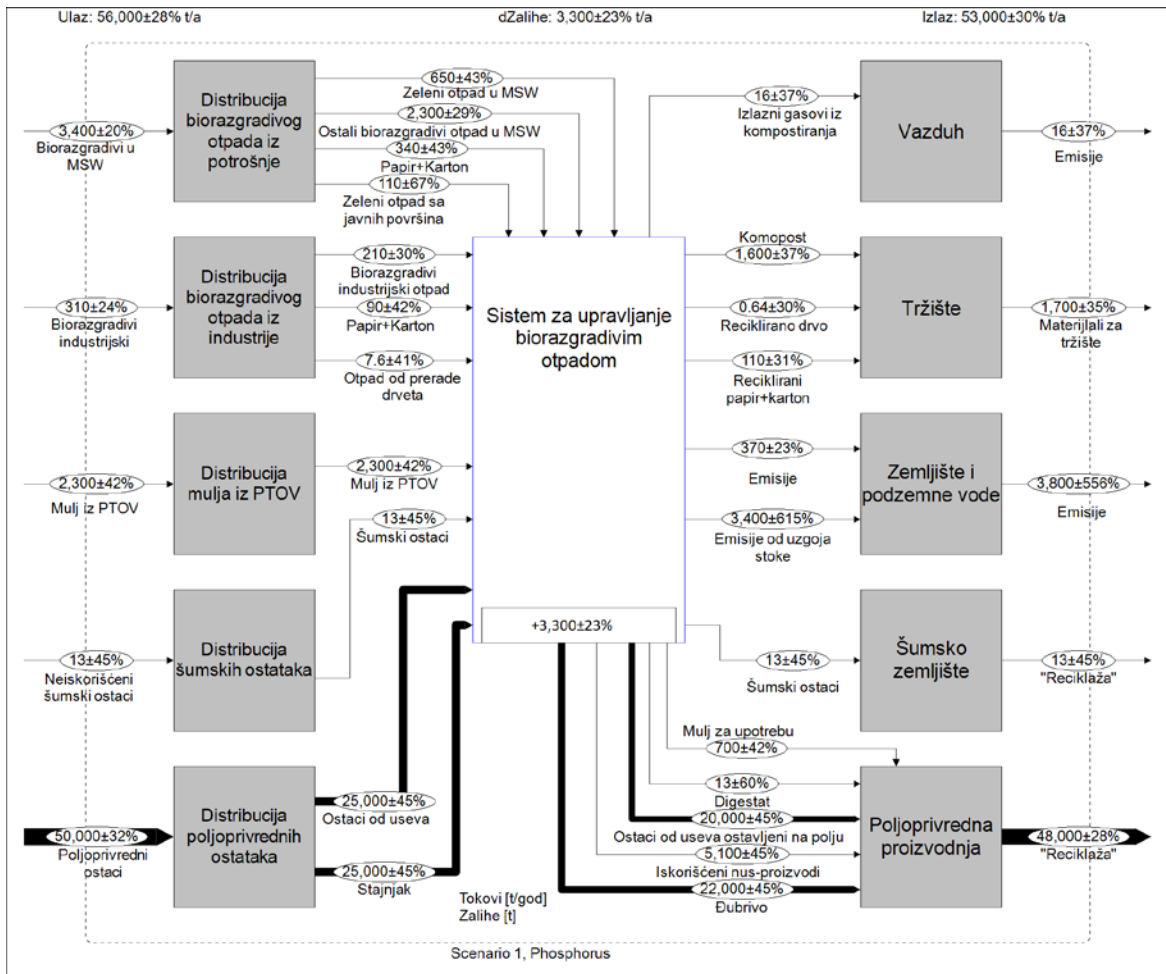
Grafik 4.13 Scenarij 1 – MFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u t·god⁻¹

4.2.2 Scenarij 1 – tokovi fosfora

Ukupna količina P koji ulazi u sistem upravljanja biorazgradivim otpadom nije se menjala u odnosu na trenutno stanje, osim u slučaju generisane količine mulja iz PTOV, koja iznosi 2.300 t P·god⁻¹. Ostali tokovi su: biorazgradivi MSW 3.400 t P·god⁻¹, biorazgradivi industrijski 310 t P·god⁻¹, neiskorišćena šumska biomasa 13 t P·god⁻¹ i ostaci iz poljoprivrede 50.000 t P·god⁻¹.

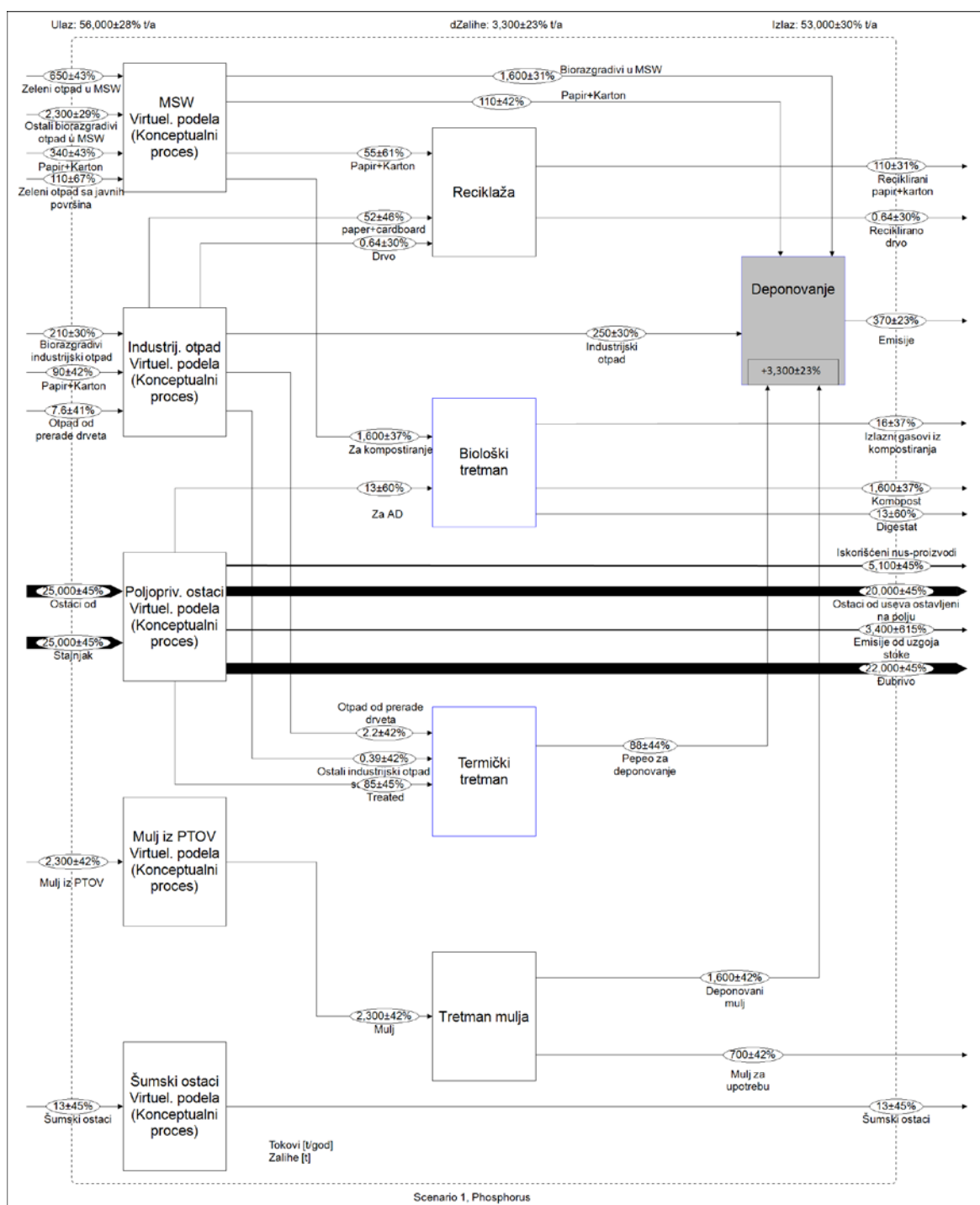
P izlazi iz sistema kroz: emisiju u vazduh (gasovi i vodena para) 1,6 t P·god⁻¹, materijal koji potencijalno ima tržišnu vrednost 1.700 t P·god⁻¹, tok u zemljište i podzemne vode 3.800 t P·god⁻¹, šumsku neiskorišćenu biomasu 13 t P·god⁻¹, i materijal koji se „reciklira“ u okviru poljoprivrede 48.000 t P·god⁻¹. Ukupno povećanje zalihe sistema iznosi 3.300 t P·god⁻¹.

Rezultati SFA za fosfor u tokovima biorazgradivog otpada prikazani su na graficima 4.14 i 4.15.



Grafik 4.14 Scenario 1 – SFA fosfora u Srbiji; podaci dati u t·P·god⁻¹

Na grafiku 4.15 prikazani su procesi tretmana i odlaganja otpada u okviru podsistema upravljanja biorazgradivim otpadom. Biološkim tretmanom se ukupno tretira 87 t P·god⁻¹, termičkim tretmanom 88 t P·god⁻¹, na reciklažu odlazi 86 t P·god⁻¹, dok u podsistem odlaganja otpada odlazi 4.300 t P·god⁻¹.

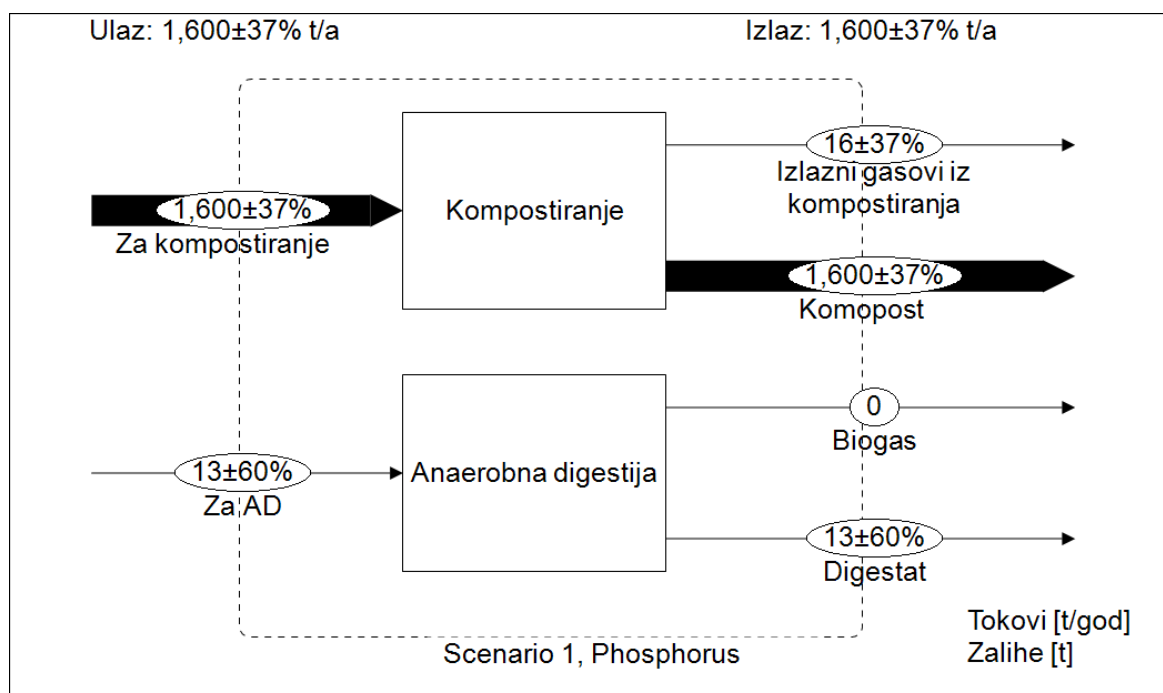


Grafik 4.15 Scenario 1 – SFA fosfora sistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsystem procesa predstavljen na grafiku 4.14); podaci dati u $t \cdot P \cdot god^{-1}$

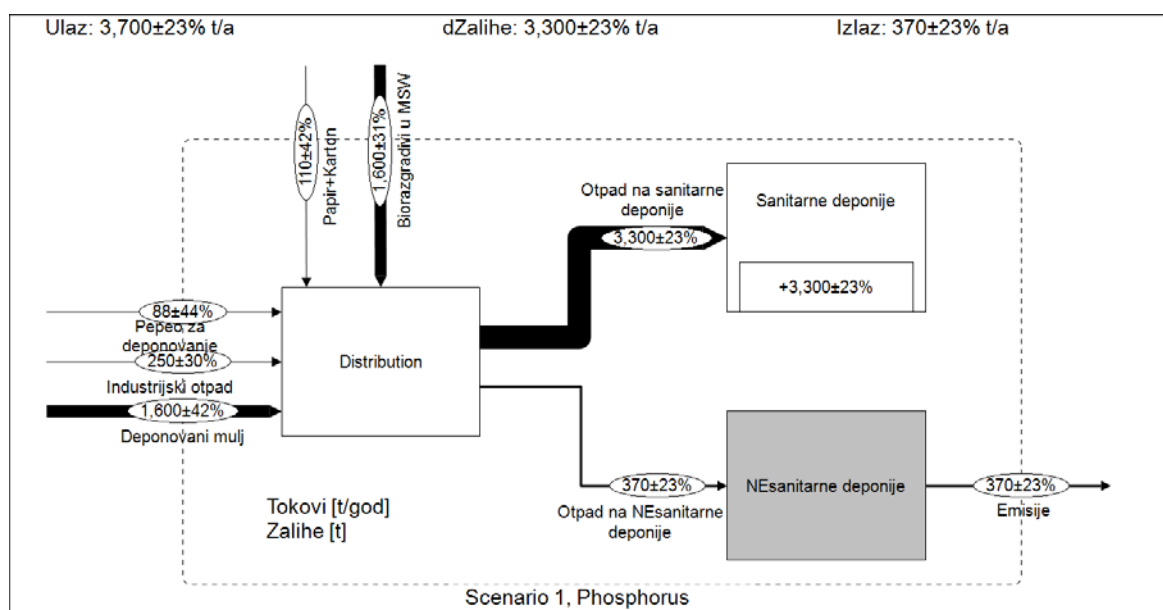
Kao i na nivou biorazgradivog otpada, slična je situacija i na nivou P, gde je najznačajniji tok P prisutan u poljoprivrednim ostacima. Gubici P iz sektora poljoprivrede kao posledica emisija sa postojećih farmi smanjeni su i sada iznose $3.400 t \cdot P \cdot god^{-1}$.

U mulju iz PTOV prisutno je $2.300 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$ ili oko $140 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$. Zbog potencijalne upotrebe mulja u svrhu kondicioniranja zemljišta, reciklira se $700 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$, dok se ostatak odlaže na deponiju.

P prisutan u komunalnom otpadu reciklira se kroz proces kompostiranja u količini od $1.600 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$ (grafik 4.16).



Grafik 4.16 Scenario 1 – SFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u $\text{t P}\cdot\text{god}^{-1}$



Grafik 4.17 Scenario 1 – SFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u $\text{t P}\cdot\text{god}^{-1}$

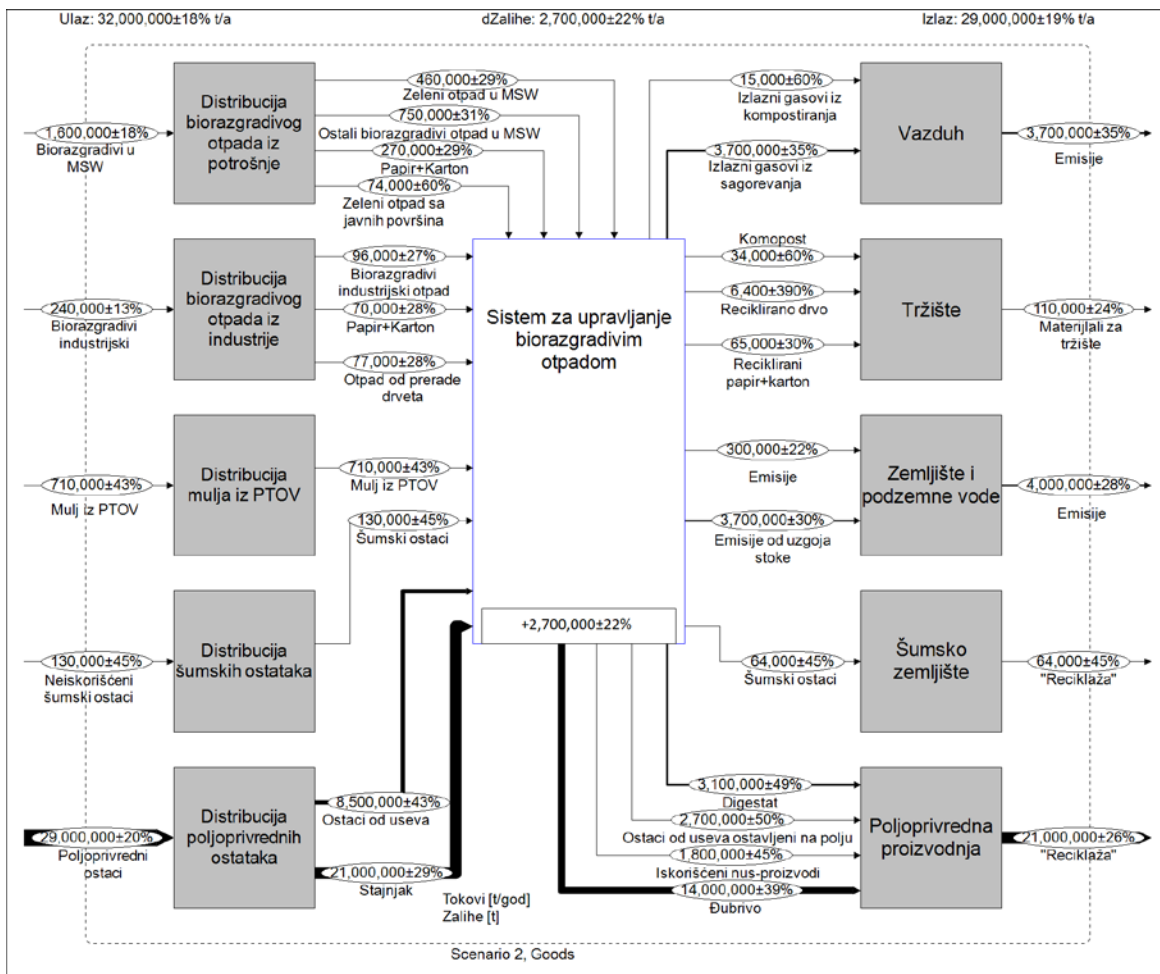
U podsistem deponovanje (grafik 4.17) odlazi ukupno 3.700 t P·god⁻¹. Najveća količina P se nalazi u biorazgradivom iz MSW i mulju iz PTOV, u oba toka po 1.600 t P·god⁻¹. Procenjuje se da se na nesantarne deponije odlaže 370 t P·god⁻¹, što ujedno predstavlja ukupnu emisiju iz ovog podsistema. Na sanitarne deponije se odlaže 3.300 t P·god⁻¹ i, mada ne predstavlja emisiju, ova količina P se ne može iskoristiti kao resurs i predstavlja zalihi sistema.

4.2.3 Scenario 2 – tokovi biorazgradivog otpada

Kao i kod scenarija 1, ukupna količina materijala koji ulazi u sistem upravljanja biorazgradivim otpadom nije se menjala u odnosu na trenutno stanje, osim u slučaju generisane količine mulja iz PTOV, koja iznosi 710.000 t·god⁻¹. Ostali tokovi iznose: biorazgradivi MSW 1.600.000 tona godišnje, biorazgradivi industrijski 240.000 t·god⁻¹, neiskorišćena šumska biomasa 130.000 t·god⁻¹ i ostaci iz poljoprivrede 29.000.000 t·god⁻¹.

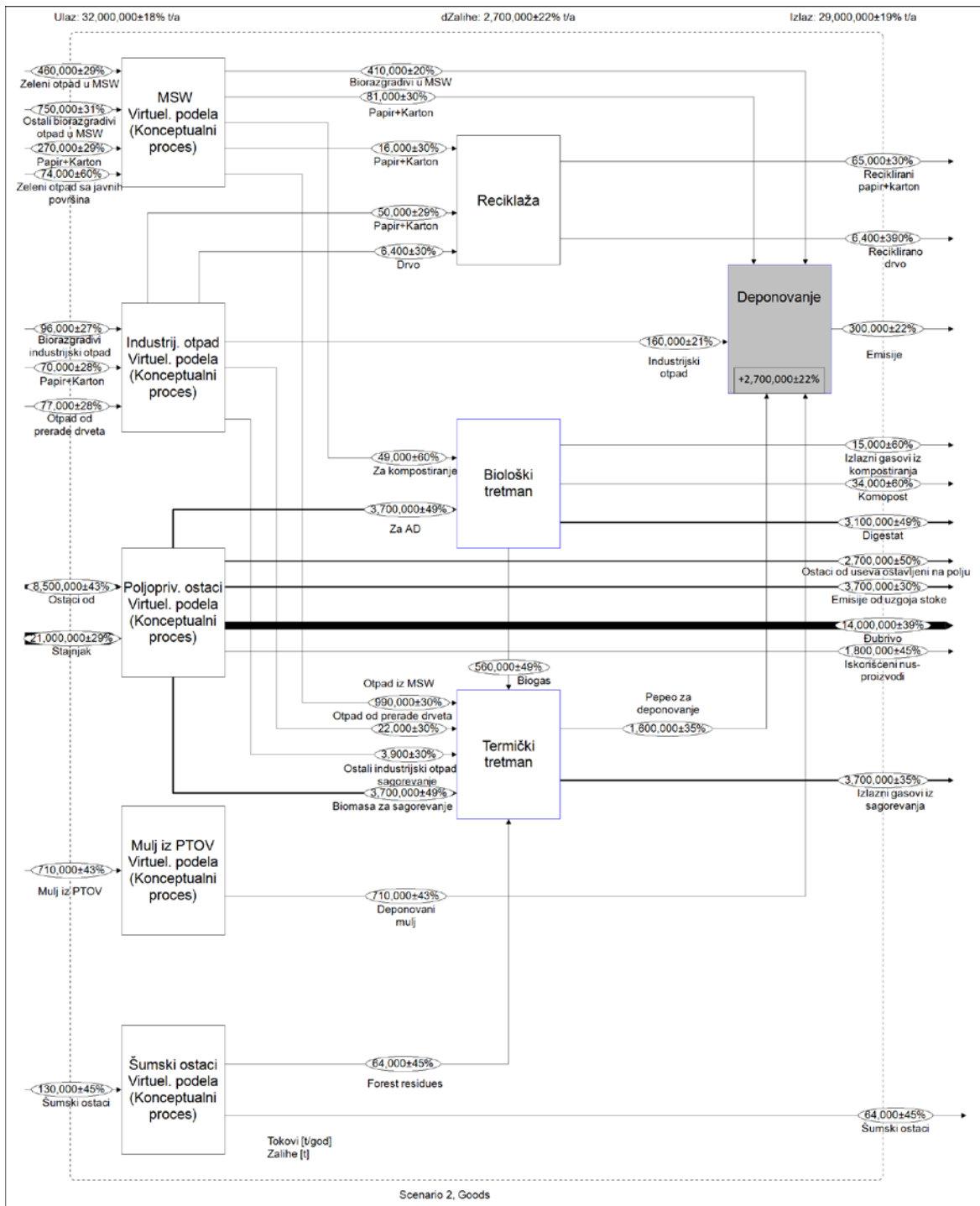
Materijali koji izlaze iz sistema predstavljaju: emisiju u vazduh 3.700.000 t·god⁻¹, materijal koji potencijalno ima tržišnu vrednost 110.000 t·god⁻¹, tok u zemljište i podzemne vode 4.000.000 t·god⁻¹, šumska neiskorišćena biomasa 64.000 t·god⁻¹ i materijal koji se „reciklira“ u okviru poljoprivrede 21.000.000 t·god⁻¹. Ukupno povećanje zalihe sistema iznosi 2.700.000 t·god⁻¹.

Rezultati MFA tokova biorazgradivog otpada u scenariju očuvanja resursa prikazani su na graficima 4.18 i 4.19.



Grafik 4.18 Scenario 2 – MFA generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji; podaci dati u t·god⁻¹

Kako je prikazano na grafiku 4.19, biološkim tretmanom se ukupno tretira 3.750.000 t·god⁻¹ materijala, termičkim tretmanom 5.300.000 t·god⁻¹, na reciklažu odlazi 72.000 t·god⁻¹, dok u podsistem odlaganja otpada odlazi 3.000.000 t·god⁻¹.



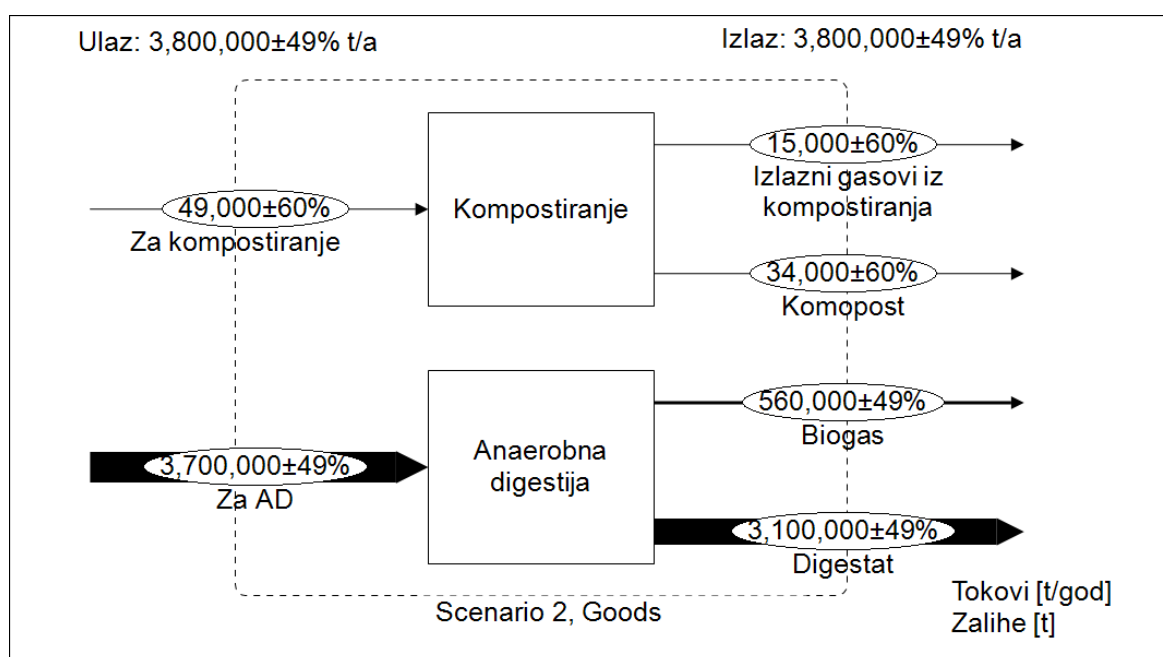
Grafik 4.19 Scenario 2 – MFA podsistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsystem procesa predstavljen na grafiku 4.18); podaci dati u t·god⁻¹

Najznačajniji tok biorazgradivog otpada i u scenariju 2 predstavljaju poljoprivredni ostaci. Količina stajnjaka koji adekvatno može da se iskoristi kao đubrivo naizgled se smanjila (na grafiku 4.19 vrednost toka je 14.000.000 tona po godini), međutim ako se toj količini doda korišćenje digestata nakon AD, onda je ukupno iskorišćenje ovog toka slično

kao i u scenariju 1. Količina neiskorišćenog potencijala ostataka od useva, usled njegovog iskorišćenja za dobijanje energije, značajno je smanjena (2.700.000 tona po godini) i sada predstavlja 10% ukupnih ostataka iz poljoprivrede ili 30% ukupnih ostataka od useva.

Drugi najvažniji tok u scenarijima predstavlja mulj iz PTOV. Količina mulja je u ovom scenariju ista kao i u prethodnom, ali nije predviđeno njegovo korišćenje.

Što se tiče biološkog tretmana, u ovom scenariju se dominantno koristi AD za tretman otpada zbog produkcije biogasa koji se koristi za proizvodnju energije. Ovim procesom se tretira 3.700.000 tona po godini (grafik 4.20).

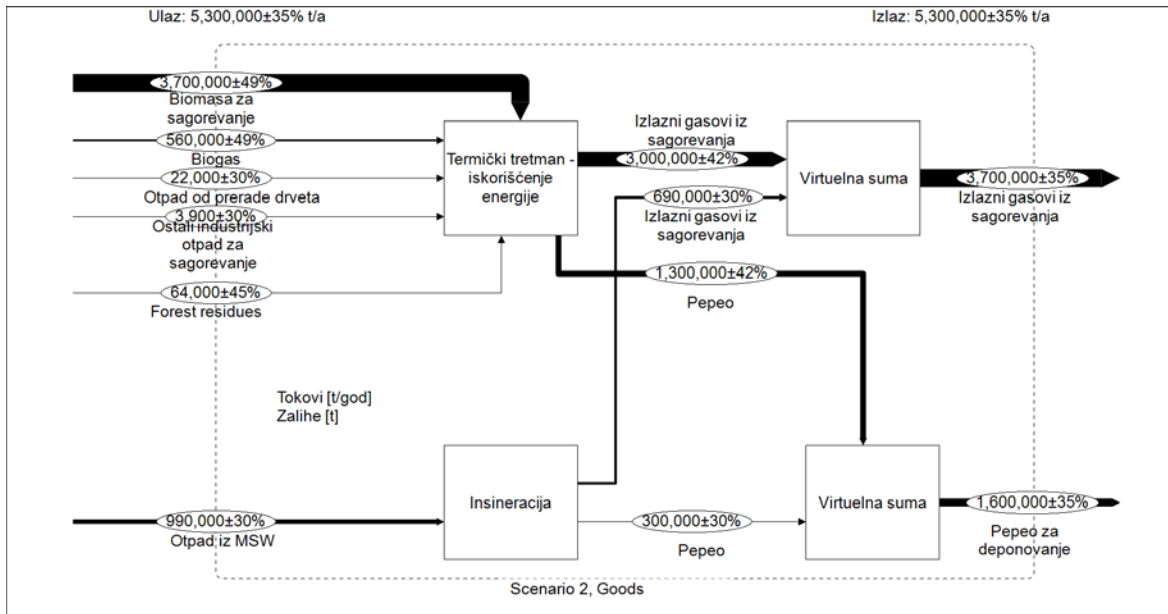


Grafik 4.20 Scenario 2 – MFA podсистema biološkog tretmana otpada; podaci dati u t·god⁻¹

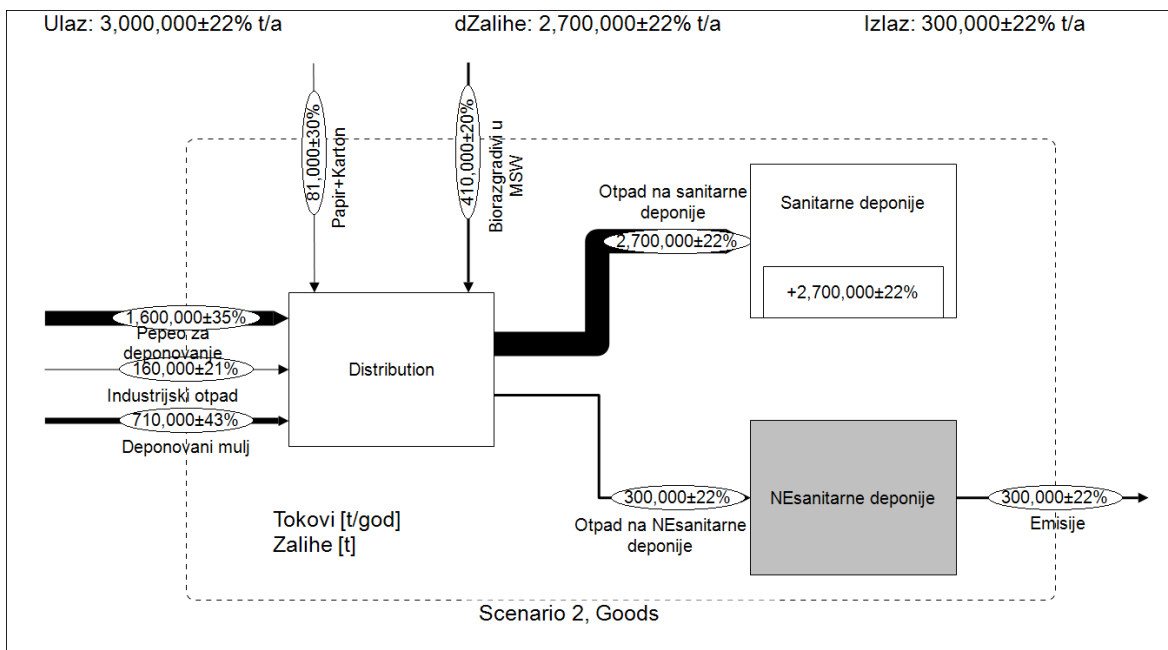
Podsystem termičkog tretmana (grafik 4.21) u ovom scenariju predstavlja ključni element pri iskorišćenju otpada u cilju dobijanja energije. Ukupna količina materijala koji se tretira iznosi oko 5.300.000 t·god⁻¹. Termički tretman je podeljen na dva osnovna procesa. Prvi je proces sagorevanja, koji se može organizovati u monoinsineratore, gde se samo jedna vrsta otpada sagoreva. Ovaj proces je dominantniji i njime se tretira 85% materijala koji ulazi u podsystem. Drugi proces je insineracija mešanog komunalnog otpada, u kome se nalazi posmatrani biorazgradivi otpad. Na ovaj način se tretira oko 1 milion t·god⁻¹.

U okviru podсистema deponovanje (grafik 4.22) i u ovom scenariju je došlo do promena. Ako poredimo sa trenutnom situacijom, povećana je ukupna količina otpada koji ulazi u proces deponovanje (3.000.000 tona godišnje), iako je veliki deo otpada preusmeren sa deponija. Preusmeravanje se odnosi na biorazgradivi MSW koji se većim delom

kompostira, a količina koja se ipak deponuje iznosi 410.000 t·god⁻¹. Povećanje deponovanog otpada je posledica velike količine pepela koji se odlaže na deponije (1.600.000 t·god⁻¹) i mulja iz PTOV (710.000 t·god⁻¹), koji se u ovom scenariju ne koristi. Može se razmotriti upotreba pepela kao sirovine u druge svrhe i tretman mulja, čime bi se smanjilo opterećenje deponija.



Grafik 4.21 Scenario 2 – MFA podsistema termičkog tretmana otpada; podaci dati u t·god⁻¹



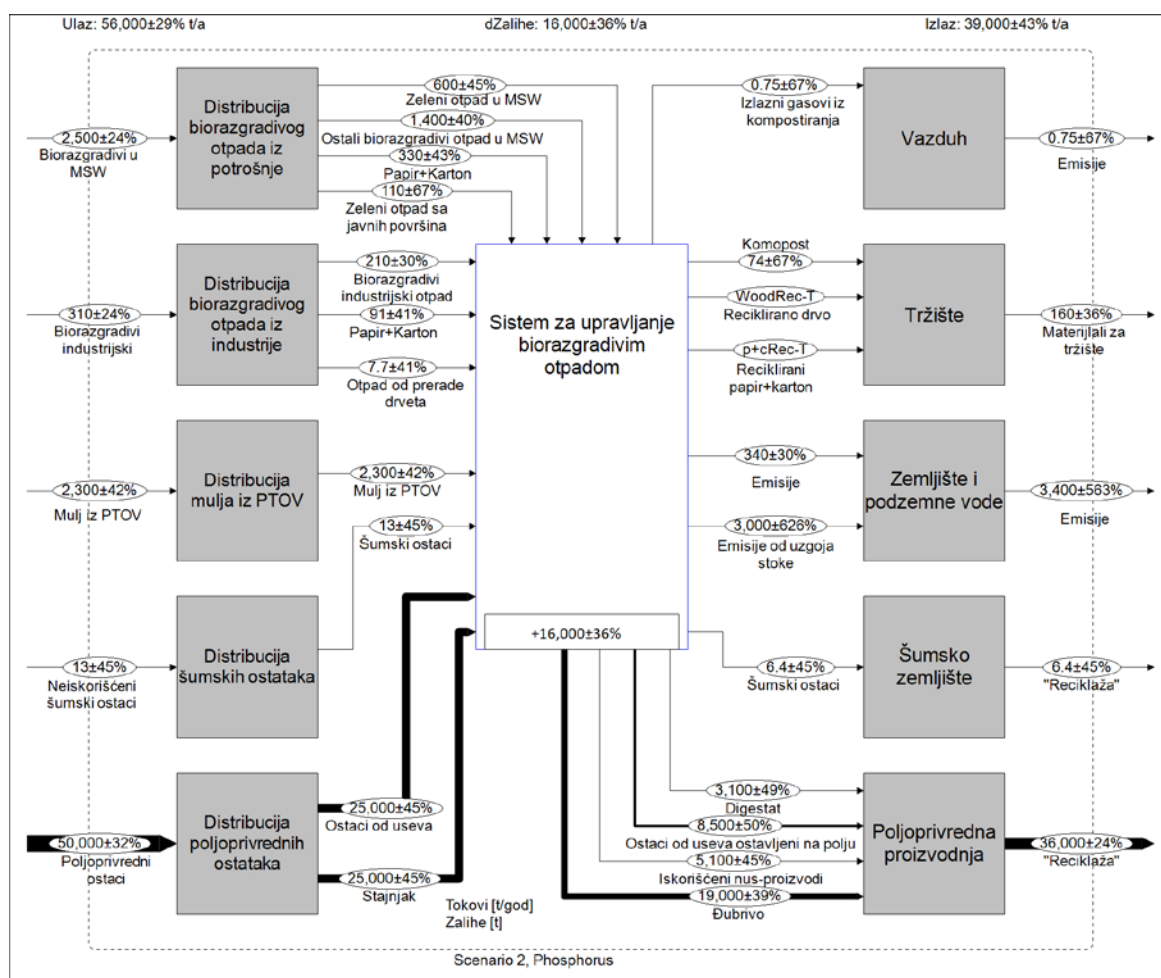
Grafik 4.22 Scenario 2 – MFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u t·god⁻¹

4.2.4 Scenario 2 – tokovi fosfora

Ukupna količina P koji ulazi u sistem upravljanja biorazgradivim otpadom, kao i u scenariju 1, nije se menjala u odnosu na trenutno stanje, osim u slučaju generisane količine mulja iz PTOV, koja iznosi 2.300 t P·god⁻¹. Ostali tokovi su: biorazgradivi MSW 3.400 t P·god⁻¹, biorazgradivi industrijski 310 t P·god⁻¹, neiskorišćena šumska biomasa 13 t P·god⁻¹ i ostaci iz poljoprivrede 50.000 t P·god⁻¹.

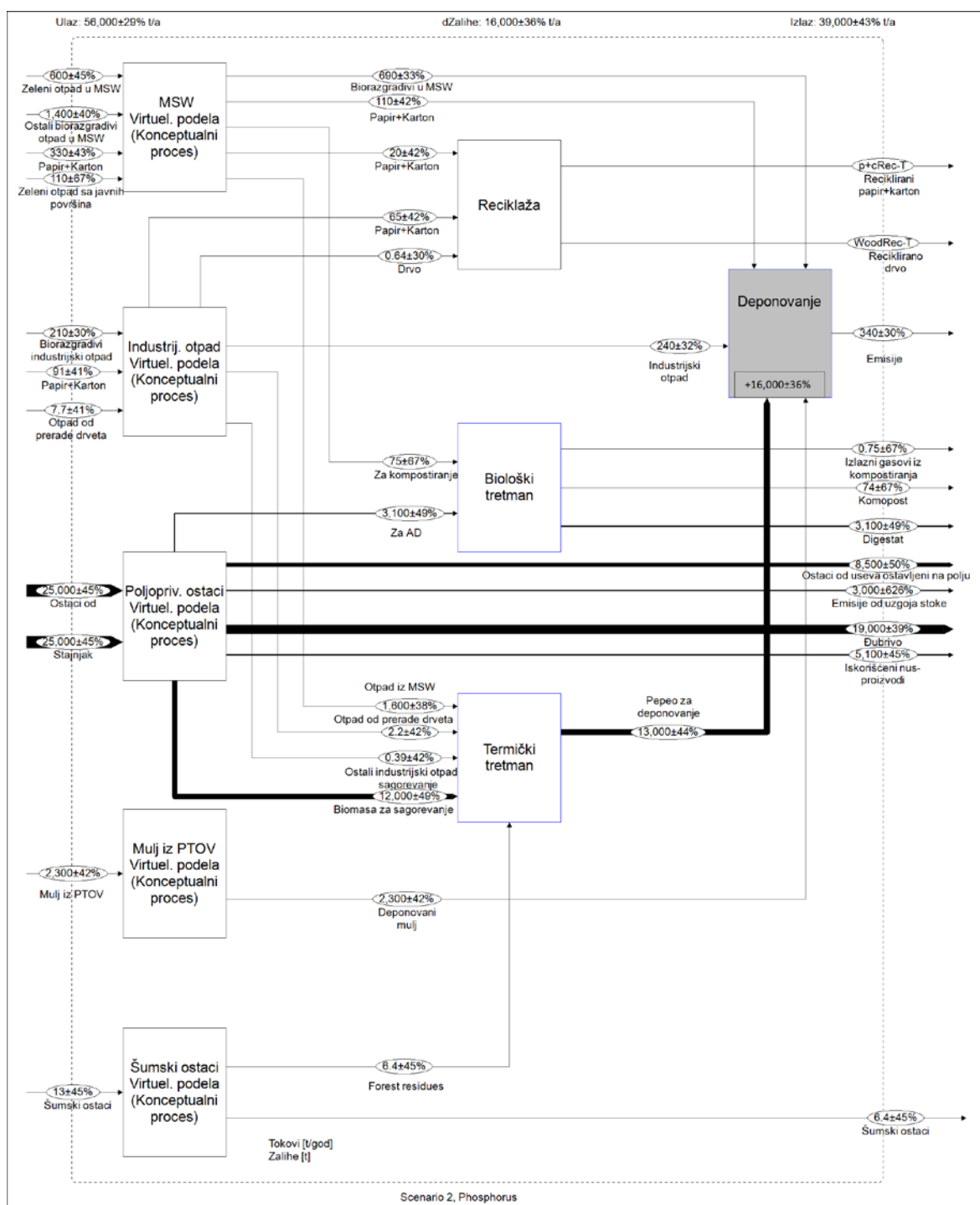
P izlazi iz sistema kroz emisiju u vazduh (gasovi i vodena para) 0,75 t P·god⁻¹, materijal koji potencijalno ima tržišnu vrednost 160 t P·god⁻¹, tok u zemljište i podzemne vode 3.400 t P·god⁻¹, šumska neiskorišćena biomasa 6,4 t P·god⁻¹ i materijal koji se „reciklira“ u okviru poljoprivrede 36.000 t P·god⁻¹. Ukupno povećanje zalihe sistema iznosi 3.300 t P·god⁻¹.

Rezultati SFA za fosfor u tokovima biorazgradivog otpada prikazani su na graficima 4.23 i 4.24.



Grafik 4.23 Scenario 2 – SFA fosfora u Srbiji; podaci dati u t P·god⁻¹

Na grafiku 4.24 prikazani su procesi tretmana i odlaganja otpada u okviru podsistema upravljanja biorazgradivim otpadom. Biološki tretmanom se ukupno tretira 3.200 t P·god⁻¹, termičkim tretmanom 1.300 t P·god⁻¹, na reciklažu odlazi 86 t P·god⁻¹, dok u podsistemu odlaganja otpada odlazi 17.000 t P·god⁻¹.

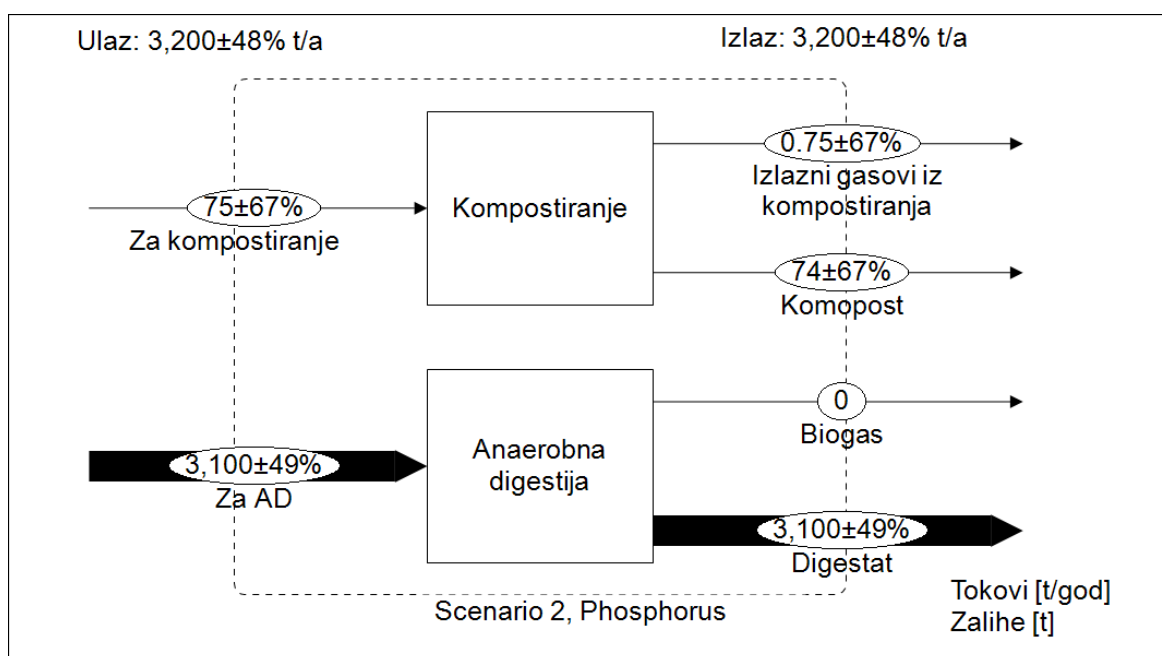


Grafik 4.24 Scenario 2 – SFA fosfora sistema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji (podsistem procesa predstavljen na grafiku 4.23); podaci dati u t P·god⁻¹

Slična je situacija i na nivou P, gde je najznačajniji tok P prisutan u poljoprivrednim ostacima. Gubici P iz sektora poljoprivrede kao posledica emisija sa postojećih farmi smanjeni su i sada iznose $3.000 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$.

U mulju iz PTOV prisutno je $2.300 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$ ili oko $140 \text{ kg P}\cdot\text{st}^{-1}\cdot\text{god}^{-1}$. Sva količina P se odlaže na deponiju.

U ovom scenariju kao biološki tretman je dominantan proces AD, kojim se reciklira $3.100 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$ (grafik 4.25). Kod ovog procesa je interesantna činjenica da reciklaža P iz ovog toka ne doprinosi povećanju ponovnog iskorišćenja P u sistemu, jer bi se i jednostavnim upotrebom đubriva on reciklirao. Proces AD je značajan zbog generisanja biogasa kao sirovine za proizvodnju energije.

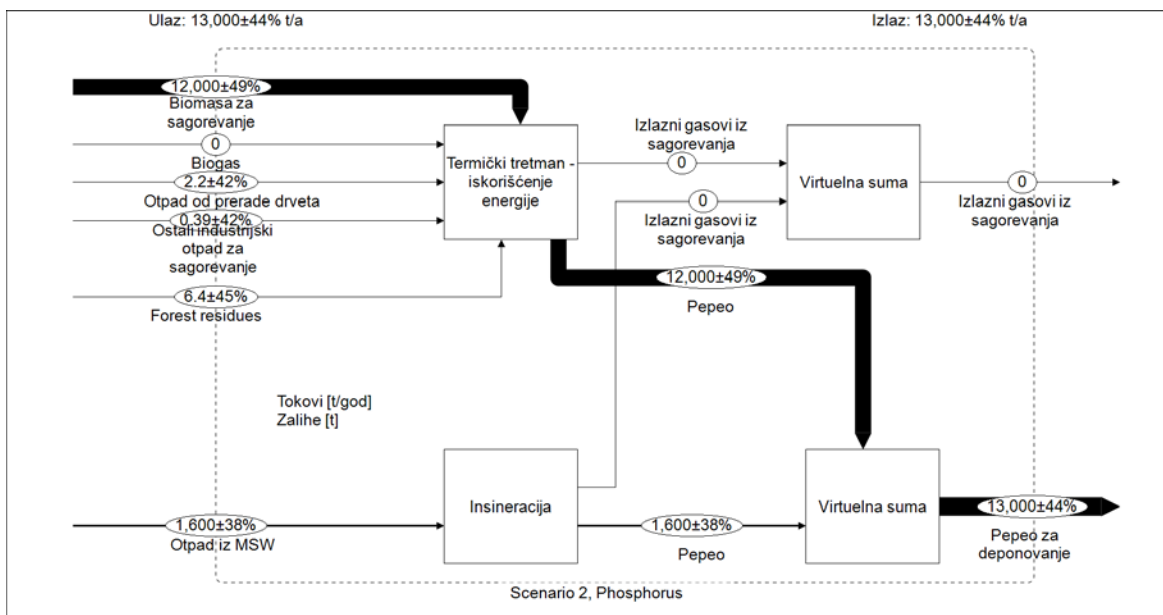


Grafik 4.25 Scenario 2 – SFA podsistema biološkog tretmana otpada; podaci dati u $\text{t P}\cdot\text{god}^{-1}$

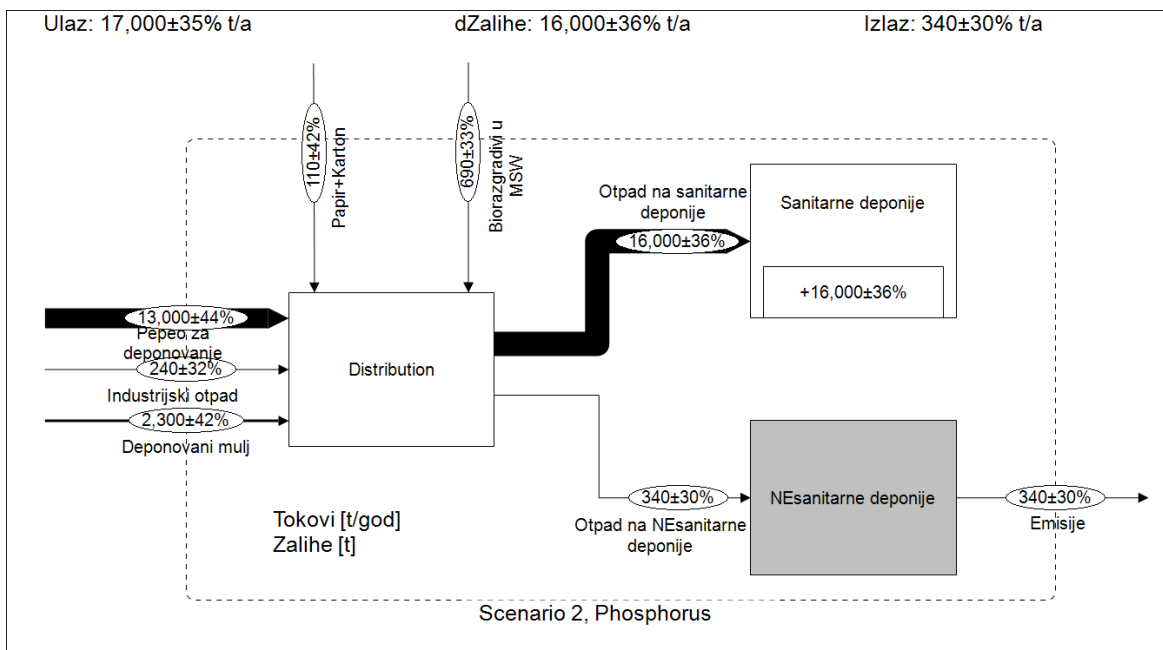
Kroz proces termičkog tretmana (grafik 4.26) u ovom scenariju prođe najveća količina P. Ukupna količina P koji se tretira iznosi oko $13.000 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$. Tokom procesa sagorevanja biomase u cilju dobijanja energije, u pepelu završava oko $12.000 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$. Fosfor sadržan u ovom toku predstavlja više od 20% fosfora u celom sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom, pa bi trebalo dodatno razmotriti opcije korišćenja pepela ili izdvajanja P iz njega. Procesom insineracija mešanog komunalnog otpada u kome se nalazi posmatrani biorazgradivi otpad, u pepelu završava $1.600 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$.

U podsistem deponovanje (grafik 4.27) odlazi ukupno $17.000 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$. Najveća količina P se nalazi u pepelu iz termičkog tretmana ($13.000 \text{ t P}\cdot\text{god}^{-1}$) i mulju iz PTOV (2.300

t P·god⁻¹). Procenjuje se da se na nesantarne deponije odlaže 340 t P·god⁻¹, što ujedno predstavlja ukupnu emisiju iz ovog podsistema. Na sanitarne deponije se odlaže 16.000 t P·god⁻¹ i, mada ne predstavlja emisiju, ova količina P se ne može iskoristiti kao resurs i predstavlja zalihi sistema.



Grafik 4.26 Scenario 2 – SFA podsistema termičkog tretmana otpada; podaci dati u t P·god⁻¹



Grafik 4.27 Scenario 2 – SFA podsistema deponovanja otpada; podaci dati u t P·god⁻¹

4.3 EVALUACIJA I POREĐENJE SCENARIJA

U cilju evaluacije i poređenja definisanih scenarija, izabrani su i opisani kriterijumi i njihovi indikatori u okviru poglavlja 3.3. Dobijeni rezultati pokazuju u kojoj meri su dostignuti ciljevi upravljanja otpadom i kako implementirane promene utiču na tokove materijala i fosfora.

Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma i indikatora prikazani su za trenutno stanje u tabeli 4.1, za scenario 1 u tabeli 4.2 i za scenario 2 u tabeli 4.3.

Tabela 4.1 Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma i indikatora uz mere za postizanje postavljenih ciljeva - trenutno stanje

Oznaka indikatora	Cilj zaštite životne sredine	Povezani tokovi	Količina, t·god ⁻¹	Količina, t P·god ⁻¹
Z1 - 1	Količina otpada koja ulazi u proces deponovanje	Biorazgradivi iz MSW	1.490.000	3.720
Z1 - 2		Mulj iz PTOV	1.000.000	220
Z2	Emisija sa deponija prouzrokovana nesantarnim odlaganjem otpada	Otpad - nesantarne deponije	2.400.000	3.800
Z3	Emisija iz poljoprivrede	Emisije iz uzgoja životinja	7.400.000	6.200
Oznaka indikatora	Cilj očuvanje resursa	Povezani tokovi	Količina, t·god ⁻¹	Količina, t P·god ⁻¹
R1	Zaliha na deponijama	Zaliha u procesu deponovanje	330.000	510
R2 - 1	Količina biorazgradivog otpada koji se ponovo upotrebi	Kompost	49.000	74
R2 - 2		Mulj iz PTOV	0	0
R3	Potencijalni resurs iz pepela	Pepeo termički tretman	110.000	88

Tabela 4.2 Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma uz mere za postizanje postavljenih ciljeva - scenario 1

Oznaka indikatora	Cilj zaštite životne sredine	Povezani tokovi	Količina, t·god ⁻¹	Količina, t P·god ⁻¹
Z1 - 1	Količina otpada koja ulazi u proces deponovanje	Biorazgradivi iz MSW	502.000	1.710
Z1 - 2		Mulj iz PTOV	500.000	1.600
Z2	Emisija sa deponija prouzrokovana nesanitarnim odlaganjem otpada	Otpad - nesanitarne deponije	580.000	370
Z3	Emisija iz poljoprivrede	Emisije iz uzgoja životinja	4.100.000	3.400
Oznaka indikatora	Cilj očuvanje resursa	Povezani tokovi	Količina, t·god ⁻¹	Količina, t P·god ⁻¹
R1	Zaliha na deponijama	Zaliha u procesu deponovanje	5.200.000	3.300
R2 - 1	Količina biorazgradivog otpada koji se ponovo upotrebi	Kompost	970.000	1.600
R2 - 2		Mulj iz PTOV	210.000	700
R3	Potencijalni resurs iz pepela	Pepeo termički tretman	110.000	88

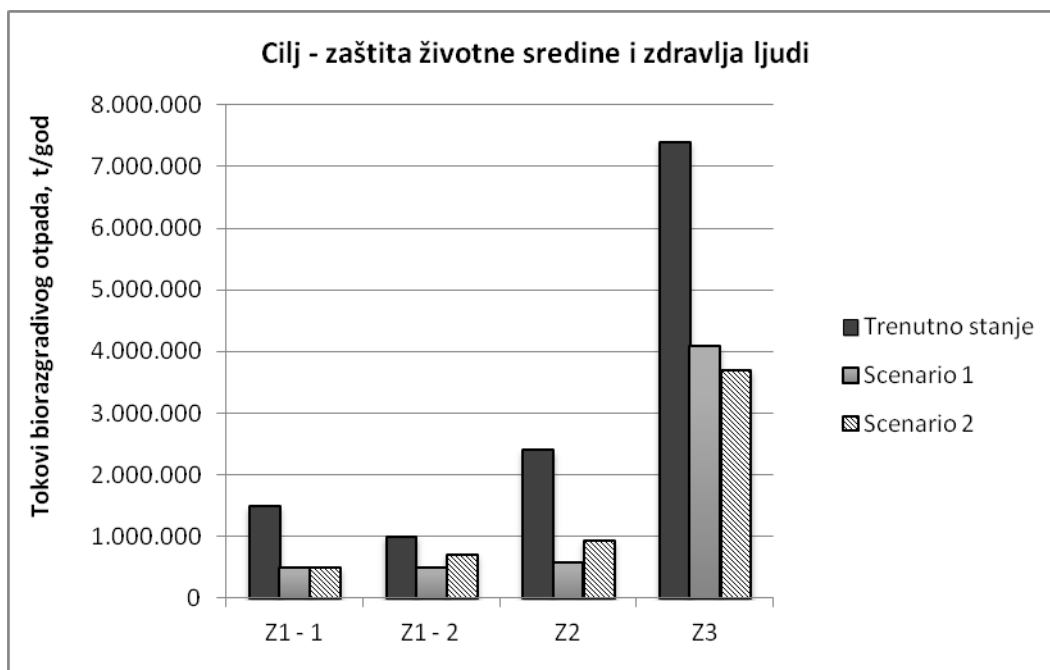
Tabela 4.3 Rezultati evaluacije izabranih kriterijuma uz mere za postizanje postavljenih ciljeva - scenario 2

Oznaka indikatora	Cilj zaštite životne sredine	Povezani tokovi	Količina, t·god ⁻¹	Količina, t P·god ⁻¹
Z1 - 1	Količina otpada koja ulazi u proces deponovanje	Biorazgradivi iz MSW	491.000	800
Z1 - 2		Mulj iz PTOV	710.000	2.300
Z2	Emisija sa deponija prouzrokovana nesantarnim odlaganjem otpada	Otpad - nesantarne deponije	940.000	340
Z3	Emisija iz poljoprivrede	Emisije iz uzgoja životinja	3.700.000	3.000
Oznaka indikatora	Cilj očuvanje resursa	Povezani tokovi	Količina, t·god ⁻¹	Količina, t P·god ⁻¹
R1	Zaliha na deponijama	Zaliha u procesu deponovanje	8.500.000	16.000
R2 - 1	Količina biorazgradivog otpada koji se ponovo upotrebi	Kompost	49.000	75
R2 - 2		Mulj iz PTOV	0	0
R3	Potencijalni resurs iz pepela	Pepeo termički tretman	1.600.000	13.000

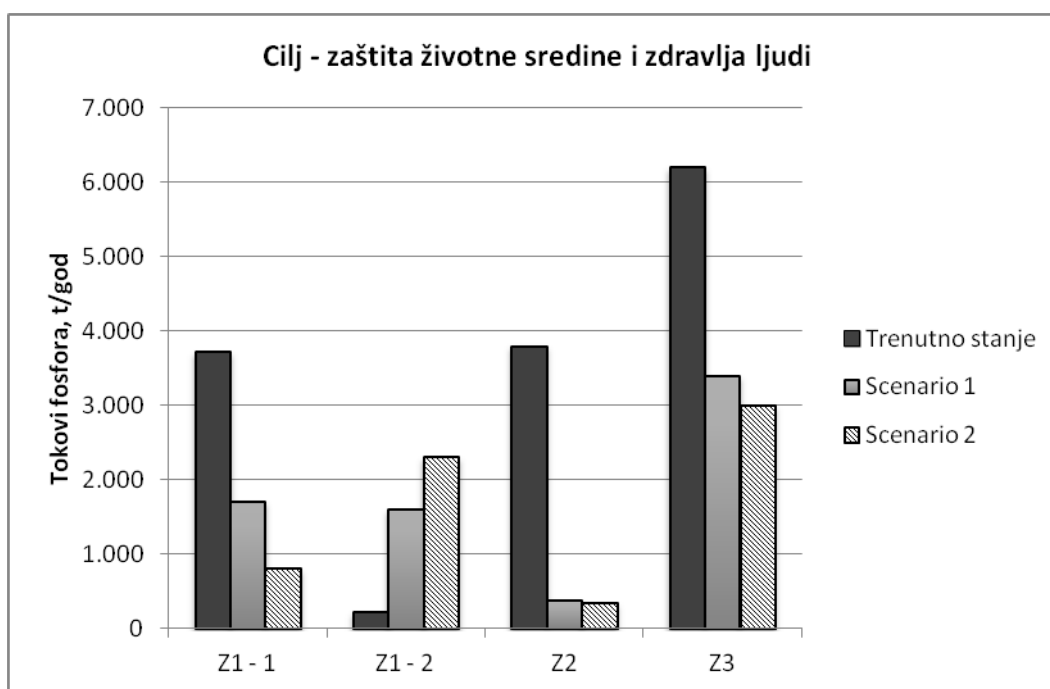
Uporedni prikaz rezultata za indikatore u cilju zaštite životne sredine prikazan je na graficima 4.28.i 4.29. Kao što se vidi na grafiku 4.28, u svakom izabranom indikatoru došlo je do očekivanog poboljšanja u odnosu na trenutno stanje. Ako se porede scenariji 1 i 2, kod indikatora količina biorazgradivog otpada koja ulazi u proces deponovanje kroz tok mulj iz PTOV (Z1-2) i emisija materijala sa deponija prouzrokovana nesantarnim odlaganjem otpada (Z2) scenario 1 ima manji uticaj na životnu sredinu. Kod indikatora količina biorazgradivog otpada koja ulazi u proces deponovanje kroz tok biorazgradivi iz MSW (Z1-1) vrednosti su približne. Kod indikatora emisija materijala iz poljoprivrede (Z3) scenario 2 pokazuje manji uticaj na životnu sredinu.

Na grafiku 4.29 prikazani su rezultati za izbrane indikatore u cilju zaštite životne sredine na nivou fosfora. U odnosu na trenutno stanje, u oba scenarija je uticaj na životnu sredinu manji za sve izabrane kriterijume, osim za indikator količina biorazgradivog otpada koja ulazi u proces deponovanje kroz tok mulj iz PTOV (Z1-2). Međutim, ako se pogleda šira

slika, ova količina izdvojenog P iz otpadne vode deluje pozitivno po životnu sredinu, jer povećanje količine generisanog mulja posledica je povećanog kapaciteta za tretman otpadne vode. Negativno je da se mulj odlaže na deponije, te je potrebno razmotriti druge opcije upravljanja.



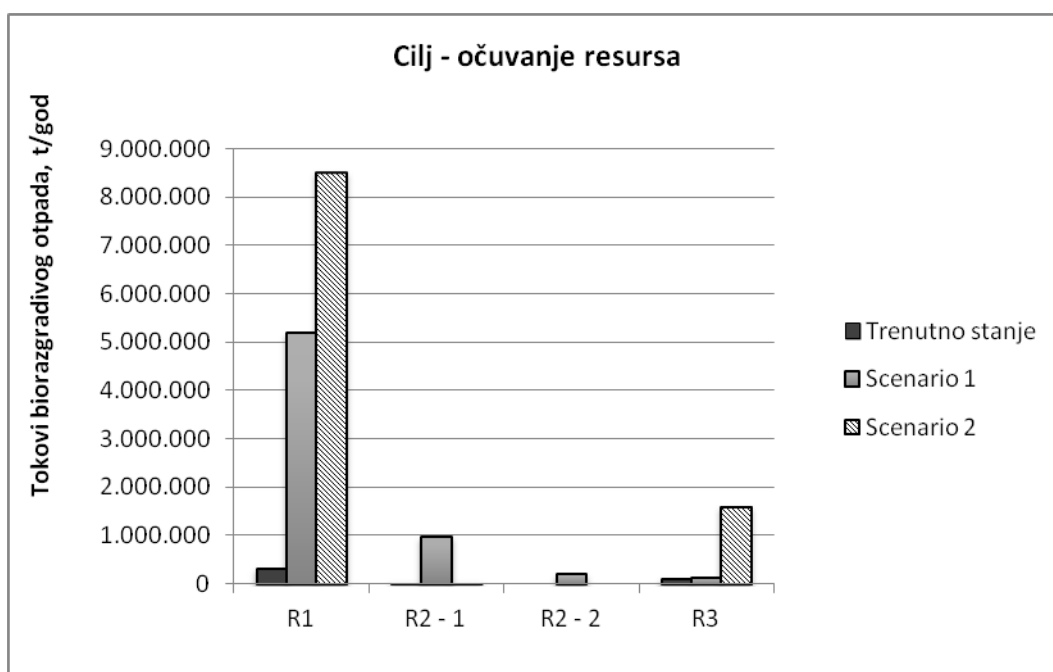
Grafik 4.28 Poređenje rezultata indikatora za zaštitu životne sredine - tokovi biorazgradivog otpada



Grafik 4.29 Poređenje rezultata indikatora za zaštitu životne sredine – tokovi P

Interesantna je činjenica i da odnosi između pojedinih indikatora nisu jednaki na nivou biorazgradivog otpada i nivou fosfora. Isti odnos između scenarija je prisutan samo kod indikatora Z3, dok kod ostalih promene u tokovima biorazgradivog otpada nisu dovele do identičnih promena i u tokovima fosfora.

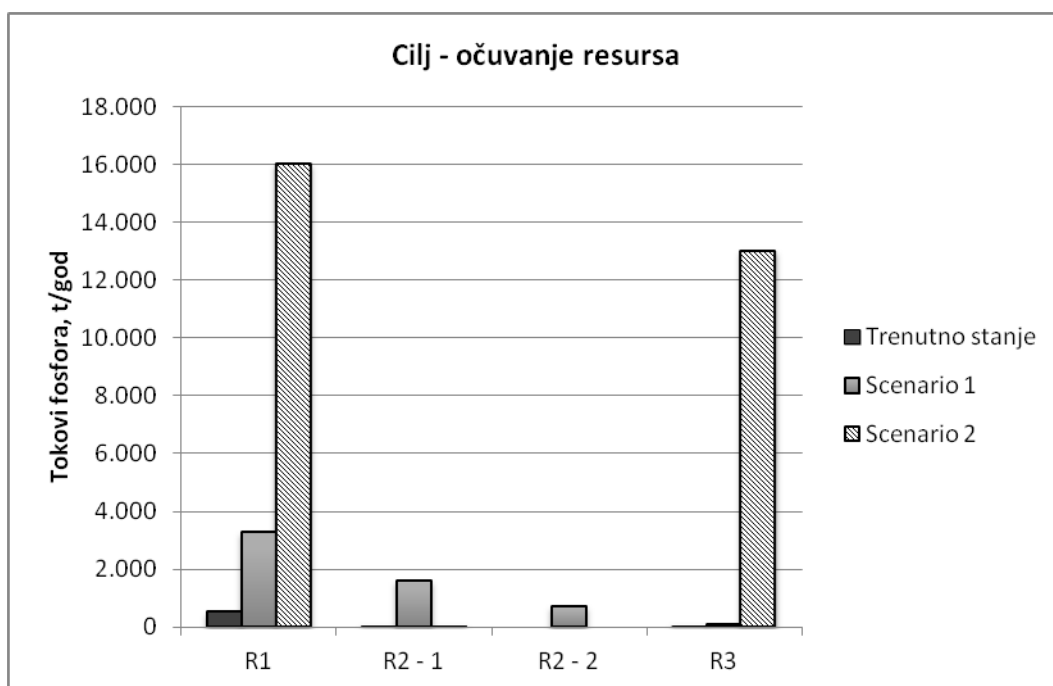
Na graficima 4.30 i 4.31 dat je uporedni prikaz rezultata za indikatore u cilju očuvanja resursa. Kao što se vidi na grafiku 4.30, indikator koji se odnosi na količinu zaliha materijala na deponijama (R1) na prvi pogled ukazuje da je situacija u oba scenarija lošija u odnosu na trenutno stanje. Međutim, kada se uzme u obzir da se u budućim scenarijima predviđa izgradnja sanitarnih deponija koje, za razliku od nesanitarnih, stvaraju prave zalihe, odnosno ne prouzrokuju emisije, ne može to isto da se zaključi. Očekivano, kod indikatora količina komposta (R2 – 1) i mulja (R2 – 2) koji se ponovo upotrebe – scenario 1 pokazuje najbolje rezultate, dok kod indikatora potencijalni resurs iz pepela (R3) najbolje rezultate ima scenario 2.



Grafik 4.30 Poređenje rezultata indikatora za očuvanje resursa - tokovi biorazgradivog otpada

Na grafiku 4.31 prikazani su rezultati za izabrane indikatore u cilju očuvanja resursa na nivou fosfora. Ako poredimo rezultate sa grafika 4.5 i 4.6, vidi se analogija između odnosa izračunatih indikatora za sve scenarije na nivou biorazgradivog otpada i na nivou fosfora. Ova konstatacija dovodi do zaključka da, kada se biorazgradivim otpadom upravlja

na takav način da se iskoristi njegov potencijal kao resurs, implementirane promene omogućavaju da se i fosforom upravlja kao resursom.



Grafik 4.31 Poređenje rezultata indikatora za očuvanje resursa – tokovi P

Uočava se da su pojedini tokovi biorazgradivog otpada uzeti kao indikatori koji su od interesa i za cilj zaštite životne sredine i zdravlja ljudi i za cilj očuvanja resursa. Ovo je vrlo važna konstatacija kojom se potvrđuje značaj ovog istraživanja jer je biorazgradivi otpad upravo to, i resurs i pollutant, u zavisnosti kako se sa njim upravlja. Takođe se na osnovu rezultata izračunatih indikatora, pored zbrinjavanja i upravljanja trenutnim tokovima biorazgradivog otpada, ističe važnost planiranja i upravljanja budućim količinama i tokovima otpada koji proizilaze iz implementiranih promena. Ovo se pre svega odnosi na povećanu količinu mulja iz PTOV i pepela nakon termičkog tretmana, jer se rešavanjem početnog problema stvaraju novi tokovi kojim se takođe treba upravljati na odgovarajući način. Ovi tokovi nisu novina, odnosno postoje i u trenutnom sistemu, ali pored toga što njihovo upravljanje nije adekvatno, očekuje se značajno povećanje količine ovih tokova.

U razvijenim zemljama, kao što je Austrija, odlaganje otpada na deponije je poslednja opcija u upravljanju otpadom i odnosi se na tokove koji ne mogu da se iskoriste na drugi način. Pepeo nakon termičkog tretmana se koristi u cementarama gde se sav fosfor konveruje u cement. Biorazgradivi otpad poreklom iz domaćinstava se kompostira, tretira u MBT postrojenjima ili ide na inseneraciju. Mulj iz PTOV se, osim deponovanja, koristi u drugim procesima kao što su upotreba u poljoprivredi, pri uređenju zemljišta, u

cementarama i insineraciji (Egle i dr., 2014.). U Fransuskoj se mulj iz PTOV koristi ili direktno ili nakon kompostiranja, a na deponije se odlaže tek 38%, dok se pepeo nakon insineracije ne koristi, ali se razmatra mogućnost korišćenja (Senthilkumar i dr., 2012). I u Danskoj se više od 50% mulja koristi u poljoprivredi, dok se pepeo nakon termičkog tretmana pored odlaganja na deponije koristi u cementarama (Klinglmair i dr.,2015).

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

5.1 ZAKLJUČCI

Donošenje odluka u planiranju upravljanja otpadom jeste kompleksan zadatak. Do sada nisu postojali alati koji će olakšati modelovanje i donošenje odluka prilikom upravljanja biorazgradivim tokovima otpada na takav način da se uključe i tokovi fosfora. U okviru istraživanja utvrđeno je da se primenom analize tokova materijala može modelovati sistem upravljanja biorazgradivim otpadom, a da se analizom tokova supstanci mogu mapirati tokovi fosfora u okviru njih. Kombinacijom MFA/SFA dobija se osnova za unapređenje upravljanja fosforom, neobnovljivim i esencijalnim resursom za koji ne postoji zamena. Kao rezultat istraživanja definisan je model koji kombinuje MFA i SFA u trenutnom sistemu upravljanja biorazgradivim otpadom i omogućava upravljanje fosforom kao resursom. Iz predstavljenih rezultata uočeni su nedostaci koje Srbija treba da unapredi kako bi dostigla standarde u upravljanju otpadom koji su postavljeni u EU.

U cilju prevazilaženja nedostataka u sadašnjem sistemu za upravljanje biorazgradivim otpadom, definisana su i analizirana dva alternativna scenarija: dostizanje ciljeva upravljanja otpadom koji se odnose na zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi i očuvanje resursa. U oba scenarija se očekuje ispunjenje istih osnovnih postavljenih ciljeva, dok se način dostizanja razlikuje. Svaki scenario predstavlja poseban sistem sa različitim kombinacijama tretmana otpada i time rezultuje različitim izlaznim tokovima. Radi poređenja ova dva scenarija, izvršena je njihova evaluacija na osnovu definisanih kriterijuma kako bi se pokazalo kako implementirane promene utiču na tokove fosfora, na mogućnost njegove upotrebe kao resursa i u cilju smanjenja emisija u životnu sredinu.

Istraživanje sprovedeno u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja prvu procenu svih tokova biorazgradivog otpada i fosfora u Srbiji. Identifikovani su glavni izvori, tokovi i analizirani potencijali za ponovnu upotrebu i smanjenje mogućih emisija u Srbiji. Rezultati naglašavaju činjenicu da su tokovi fosfora uglavnom linearni zbog nepostojanja ili ograničenih tehničkih mera za tretman i ponovnu upotrebu ovog resursa. U trenutnom stanju identifikovana je samo upotreba fosfora kao resursa u slučaju kada se koristi kompost dobijen iz zelenog otpada i iz postrojenja za biogas, ali zanemarljivih kapaciteta.

Poljoprivredni tokovi su istovremeno najveći uzročnici emisija, ali i imaju najveći potencijal za proizvodnju energije i kasnije iskorišćenje fosfora iz pepela. Analiza pokazuje da su najveće emisije P rezultat neadekvatnog skladištenja ostataka od uzgoja životinja. Sa druge strane, najveći potencijal ponovne upotrebe/recikliranja fosfora ima

neiskorišćena biomasa iz poljoprivrede. Iako se trenutno skoro ne koristi, biorazgradivi otpad iz MSW takođe ima potencijal kao resurs i njegova upotreba je veoma zastupljena u razvijenim zemljama. Preduslov za njegovo korišćenje je odvojeno sakupljanje biootpada, koji se trenutno direktno odlaže na deponije i time prouzrokuje emisije. U otpadnim vodama je identifikovan veliki potencijal fosfora kao resursa, ali njegovo korišćenje zahteva unapređenje monitoringa i poboljšanje celokupnog sistema upravljanja otpadnim vodama, kroz izgradnju velikog broja postrojenja za tretman otpadnih voda i mulja. Kod poređenja rezultata izračunatih indikatora izdvaja se činjenica da promene u tokovima biorazgradivog otpada ne rezultiraju identičnim promenama na nivou fosfora. Zaključak je: da bi se omogućilo ciljno orijentisano upravljanje biorazgradivim otpadom, potrebno je izvršiti analizu i na nivou dobara i supstanci. Samo kroz obe analize može se sagledati uticaj implementiranih promena u sistemu na upravljanje fosforom kao resursom.

5.2 MOGUĆNOSTI IMPLEMENTACIJE REZULTATA I DALJI PRAVCI U ISTRAŽIVANJU

Rezultati ovog istraživanja će pomoći donosiocima odluka pružajući informacije za budući razvoj održivog upravljanja fosforom u Srbiji, ali i u drugim sličnim ekonomijama. Modelovanjem sistema moguće je predvideti kakav će uticaj imati usvojene promene u okviru sistema za upravljanje otpadom na ukupne tokove, kao i na tokove fosfora. Analizom potencijala otpada kao izvora fosfora može se uticati na upotrebu i uvoz mineralnih đubriva. Buduća analiza bi mogla pokazati koliko se može smanjiti upotreba mineralnih P đubriva.

Rezultati prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji predstavljaju početak istraživanja u oblasti analize tokova fosfora u Srbiji. Dalje aktivnosti bi se mogle sprovesti u dva pravca:

1. MFA svih tokova materijala (ne samo biorazgradivog otpada) i SFA fosfora u okviru celokupnog sistema upravljanja otpadom. Analiza kompletnog sistema upravljanja otpadom je veoma bitna jer, iako je P većinski prisutan u biorazgradivom otpadu, ovi tokovi se teško mogu razdvojiti.
2. Izvršiti analizu tokova fosfora za celi antropogeni metabolizam na nacionalnom nivou. Ova analiza, pored toga što će pružiti informacije o tokovima fosfora u svim sektorima (industrija, poljoprivreda...), a ne samo kod upravljanja otpadom, omogućiće i lakše poređenje dobijenih rezultata sa stanjem u drugim državama, jer su već razvijeni brojni modeli čiji je cilj upravo ovakva analiza.

6. LITERATURA

- Adegbeye, M.J., Ravi Kanth Reddy, P., Obaisi, A.I., Elghandour, M.M.M.Y., Oyebamiji, K.J., Salem, A.Z.M., Morakinyo-Fasipe, O.T., Cipriano-Salazar, M., Camacho-Díaz, L.M., 2020. Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations— An overview. *Journal of Cleaner Production* 242: 118319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118319>
- Alam O., Qiao X., 2020. An in-depth review on municipal solid waste management, treatment and disposal in Bangladesh, *Sustainable Cities and Society*, 52, 101775, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101775>.
- Al-Khatib, I.A., Monou, M., Abu Zahra, A.S.F., Shaheen, H.Q., Kassinos, D., 2010. Solid waste characterization, quantification and management practices in developing countries. A case study: Nablus district—Palestine, *Journal of Environmental Management* 91: 1,131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.003>
- Allesch A., Brunner P.H., 2017. Material Flow Analysis as a Tool to improve Waste Management Systems: The Case of Austria, *Environ. Sci. Technol.* 51(1): 540–551 <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04204>
- Al-Muzaini, S., Hamoda, M.F., 1999. Selection of an effective sludge dewatering system for a small wastewater treatment plant, *Environment International*, Volume 25, Issue 8, Pages 983-990. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(99\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(99)00007-0).
- ARCOTRASS - Consortium 2006. Study on the State of Agriculture in Five Applicant Countries, Country Report: Serbia. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/key_policies/documents/ext-study-applicant-serbia_2006_en.pdf
- Arena, U., Di Gregorio, F., 2014. A waste management planning based on substance flow analysis *Resources, Conservation and Recycling* 85, 54– 66 DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.05.008
- Ashley, K., Cordell, D., Mavinic, D., 2011. A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere* 84(6): 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.001>

- AZŽS (Agencija za zaštitu životne sredine) 2019. Upravljanje otpadom u Republici Srbiji u periodu 2011-2018. godina, Ministarstvo zaštite životne sredine
- Baccini, P., Brunner, P., 2012. *Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, evaluation, design* (2nd edition). 10.7551/mitpress/8720.001.0001.
- Barrena, R., Font, X., Gabarrell, X., Sánchez, A., 2014. Home composting versus industrial composting: influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. *Waste Management* 34: 1,109–1,116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.008>
- Batinić, B., 2015. Model za predviđanje količine ambalažnog i biorazgradivog otpada primenom neuronskih mreža, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- Biswas Chowdhury, R., Moore, G.A., Weatherley, A.J., 2018. A multi-year phosphorus flow analysis of a key agricultural region in Australia to identify options for sustainable management. *Agricultural Systems* 161: 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.12.005>
- Brunner i dr.,1998. *Material accounting as a policy making tool in environmental policy*. Institute for Water Quality and Waste Management, Vienna University of Technology, Austria.
- Brunner, P. H., Rechberger, H. 2016. *Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers*, Second Edition, CRC Press - Taylor & Francis Group, ISBN: 9781498721349
- Brunner, P. H.; Baccini, P. 1992. Regional material management and environmental protection *Waste management & research* 10 (2) 203– 212 DOI: 10.1177/0734242X9201000208
- Brunner, P., Rechberger, H., 2004. *Practical handbook of material flow analysis*, Boca Raton, FL: CRC/Lewis.
- Brunner, P.H., Fellner, J., 2007. Setting priorities for waste management strategies in developing countries. *Waste Management and Research*. 25, 234-240.
- Cencic, O., Rechberger, H., 2008. Material flow analysis with software STAN. *Journal of Environmental Engineering and Management (JEEM)* 18(1): 3–7.
- Challcharoenwattana, A. Pharino C., 2015. Co-benefits of household waste recycling for local community's sustainable waste management in Thailand, *Sustainability*, 7: 7417-7437

- Chen, M., Chen, J., Sun, F., 2008. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of The Total Environment*: 405 (1–3): 140-152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.031>.
- Cooper, T., Pezold, T. (eds.), Keenleyside, C., Đorđević-Milošević, S., Hart, K., Ivanov, S., Redman, M., Vidojević, D., 2010. Developing a National Agri-Environment Programme for Serbia. Gland, Switzerland and Belgrade, Serbia: IUCN Programme Office for South-Eastern Europe. pp. 88. https://www.sepa.gov.rs/download/ae_programme_for_serbia.pdf
- Cordell D., Drangert J.-O., White S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought, *Global Environ. Change*, 19 (2): 292-305
- Cordell D., Neset T.S.S., Prior T. 2012. The phosphorus mass balance: identifying 'hotspots' in the food system as a roadmap to phosphorus security, *Curr. Opin. Biotechnol.*, 23 (6): 839-845, [10.1016/j.copbio.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.03.010)
- Cordell D., White S., 2015. Tracking phosphorus security: indicators of phosphorus vulnerability in the global food system, *Food Secur.*, 7 (2): 337-350, [10.1007/s12571-015-0442-0](https://doi.org/10.1007/s12571-015-0442-0)
- Cordell, D., Jackson, M., White, S., 2013. Phosphorus flows through the Australian food system: Identifying intervention points as a roadmap to phosphorus security. *Environmental Science & Policy* 29: 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.01.008>
- Cordell, D., Rosemarin, A., Schröder, J.J., Smit, A.L., 2011. Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84: 747–758. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.032>
- Cvetković, S., Kaluđerović Radoičić, T., Vukadinović, B., Kijevčanin, M., 2014. Potentials and status of biogas as energy source in the Republic of Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.005>
- Das S., Lee S.H., Kumar P., Kim K.H., Lee S.S., Bhattacharya S.S., 2019, Solid waste management: scope and the challenge of sustainability *J. Clean. Prod.*, 228: 658-678, [10.1016/j.jclepro.2019.04.323](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323)
- Döberl, G., Huber, R., Brunner, P. H., Eder, M., Pierrard, R., Schönback, W., Frühwirth, W., Hutterer, H., 2002. Long-term assessment of waste management options - a new, integrated and goal-oriented approach *Waste Management & Research* 20 (4) 311– 327 DOI: [10.1177/0734247X0202000402](https://doi.org/10.1177/0734247X0202000402)

- Drangert, J.O. 2012. Phosphorus—a Limited Resource that Could be Made Limitless, *Procedia Engineering* 46, 228-233, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.469>.
- Durević D, Blečić P, Jurić Ž, 2019. Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia, *Energies* 12: 1927. doi:10.3390/en12101927
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., Zessner, M., 2016. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment* 571: 522–542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019>
- Egle, L., Zoboli, O., Thaler, H., Rechberger, H., Zessner, M., 2014. The Austrian P budget as a basis for resource optimization. *Resources, Conservation and Recycling* 83: 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.009>
- Energy Saving Group, 2007. Studija opravdanosti korišćenja drvnog otpada u Srbiji, finansirao USAID.
- Funari V, Meisel T, Braga R, 2016. The potential impact of municipal solid waste incinerators ashes on the anthropogenic osmium budget. *Sci. Total Environ.*, 541: 1549-1555
- Ghawi, A.H., 2018. Optimum Design of Phosphorus and Nitrogen Removal from Domestic Wastewater Treatment Plant. *International Journal of Engineering and Technology* 7:310-315. <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.20.25945>
- Gorauskiene I., Stasiskiene Ž. (2011) Application of material flow analysis to estimate the efficiency of e-waste management systems: the case of Lithuania, *Waste Management & Research*, 29(7) 763–777
- Hedbrant, J., Sörme, L., 2001. Data vagueness and uncertainties in urban heavy-metal data collection. *Water Air Soil Pollut.: Focus* 1(3–4): 43–53. <https://doi.org/10.1023/A:1017591718463>
- Hering JG, 2012. An end to waste? *Science*, 337:623–623
- ICPDR (International Commission for the Protection of the Danube River), 2009. Danube River Basin District Management Plan.
- Ilić, M., Nikolić, M., 2016. Drivers for development of circular economy – A case study of Serbia. *Habitat International* 56: 191-200, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.06.003>.
- Ilic-Krstic, I., Radosavljevic, J., Đorđević, A., Avramović, D., Vukadinovic, A. 2018. Composting as a method of biodegradable waste management. *Facta*

- Universitatis: Working and Living Environmental Protection Vol. 15, No 2, 2018, pp. 135 – 145. <https://doi.org/10.22190/FUWLEP1802135I>
- IMG (International Management Group), 2015. Report on quantities and morphological composition of waste for representative municipalities in Serbia 2015.
- IPARD II 2019. Zaključak o usvajanju IPARD programa za Republiku Srbiju za period 2014-2020. Godine, Official Gazette of the Republic of Serbia, br. 30/2016, 84/2017, 20/2019 i 55/2019. <http://uap.gov.rs/wp-content/uploads/2017/11/IPARDII-final-III-modification-ENG27062019.pdf>
- Iqbal A., Liu X., Chen G.H., 2020. Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques, *Science of The Total Environment* 729, 138622, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>.
- Islam MT, Huda N, 2019. Material flow analysis (MFA) as a strategic tool in E-waste management: Applications, trends and future directions, *Journal of Environmental Management* 244:344-361, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.062>.
- Kalmykova, Y., Fedje, K.K., 2013. Phosphorus recovery from municipal solid waste incineration fly ash. *Waste Manag.* 33: 1,403–1,410. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.040>
- Kalmykova, Y., Harder, R., Borgstedt, H., Svanang, I., 2012. Pathways and management of phosphorus in urban areas. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 928–939.
- Katinas V., Marčiukaitis M., Perednis E., Dzenajavičienė E.F., 2019. Analysis of biodegradable waste use for energy generation in Lithuania, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101: 559-567, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.022>
- Kaza S., Yao L.C., Bhada-Tata P., VanWoerden F., 2018. What a Waste 2.0, World Bank, Washington, DC 10.1596/978-1-4648-1329-0
- Kiddee P , Naidu R, Wong MH, 2013. Electronic waste management approaches: an overview. *Waste Manag.*, 33:1237-1250
- Klinglmair, M., Lemming, C., Jensen, L.S., Rechberger, H., Astrup, T.F., Scheutz, C., 2015. Phosphorus in Denmark: National and regional anthropogenic flows. *Resources, Conservation and Recycling* 105: 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.019>

- Lamers, F., Cremers, M., Matschegg, D., i dr. 2018. Options for increased use of ash from biomass combustion and co-firin, IEA Bioenergy
- Laner, D., Rechberger, H., Astrup, F.T., 2015. Applying fuzzy and probabilistic uncertainty concepts to the material flow analysis of palladium in Austria. *J. Ind. Ecol.* 19(6): 1,055–1,069. <https://doi.org/10.1111/jiec.12235>
- Lederer, J., Karungi, J., Ogwang, F., 2015. The potential of wastes to improve nutrient levels in agricultural soils: A material flow analysis case study from Busia District, Uganda, *Agriculture. Ecosystems and Environment* 207: 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.024>
- Lederer, J., Kral, U., 2015. Theodor Weyl: A Pioneer of Urban Metabolism Studies. *Journal of Industrial Ecology*, 19: 695-702. doi:10.1111/jiec.12320
- Lederer, J., Rechberger, H., 2010. Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options. *Waste Management*, 30, 1043–1056.
- Li, B., Boiarkina, I., Young, B., Yu, W., 2015. Substance flow analysis of phosphorus within New Zealand and comparison with other countries. *Science of The Total Environment*, 527–528: 483-492, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.060>
- Li, B., Li, P., Zeng, X. C., Yu, W., Huang, Y. F., Wang, G. Q., Young, B. R. 2020. Assessing the sustainability of phosphorus use in China: Flow patterns from 1980 to 2015. *Science of The Total Environment*, vol. 704, p. 135305 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135305>
- Liu, Y., Mol, A.P.J. and Chen, J. 2004. Material Flow and Ecological Restructuring in China. *Journal of Industrial Ecology*, 8: 103-120. <https://doi.org/10.1162/1088198042442261>
- Ma, D., Hu, S., Chen, D., Li, Y., 2012. Substance flow analysis as a tool for the elucidation of anthropogenic phosphorus metabolism in China. *Journal of Cleaner Production* 29–30: 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.033>
- MAEP (Ministry of Agriculture and Environmental Protection), EAA (Environment Agency Austria), 2019. Twinning Project - Support to Waste Management Policy SR13/IPA/EN/04 16
- Masood, M.; Barlow, C. Y., Wilson, D. C. 2014. An assessment of the current municipal solid waste management system in Lahore, Pakistan *Waste Manage. Res.* 32 (9) 834– 847 DOI: 10.1177/0734242X14545373

- Mastellone, M. L., Brunner, P. H., Arena, U. 2009. Scenarios of Waste Management for a Waste Emergency Area. *J. Ind. Ecol.* 13 (5) 735– 757 DOI: 10.1111/j.1530-9290.2009.00155.x
- Matsubae-Yokoyama K, Kubo H, Nakajima K, Nagasaka T., 2009. A material flow analysis of phosphorus in Japan. *Journal of Industrial Ecology* 13(5): 687–705. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00162.x>
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W.. 1972. *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind* Universe Books, New York
- Mikic, M., Naunovic, Z., 2013. A sustainability analysis of an incineration project in Serbia. *Waste Management & Research* 31(11): 1,102–1,109. <https://doi.org/10.1177/0734242X13487582>
- Moriguchi Y., Hashimoto S., 2016. *Material Flow Analysis and Waste Management*. In: Clift R., Druckman A. (eds) *Taking Stock of Industrial Ecology*. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7_12
- N'Goran, K.M., Yao, K.M., Kouassi, N.L.B., Trokourey, A., 2019. Phosphorus and nitrogen speciation in waters and sediments highly contaminated by an illicit urban landfill: the Akouedo landfill, Côte d'Ivoire. *Regional Studies in Marine Science* 31: 100805 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100805>
- Olufunke C., Nikiema, J., Robert, I., Noah, A., Paul, J., Doulaye, K., 2016. *Co-composting of Solid Waste and Fecal Sludge for Nutrient and Organic Matter Recovery*. RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 3, CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems, International Water Management Institute (IWMI).
- Ott, C., Rechberger, H., 2012. The European phosphorus balance. *Resources, Conservation and Recycling* 60(3): 159–72. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.007>
- Pires A., Martinho G., Chang N.B., 2011. Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques, *Journal of Environmental Management*, 92(4): 1033-1050, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.024>.
- PSUGZ (Pokrajinski Sekretarijat za urbanizam, graditeljstvo i zaštitu životne sredine), 2015. *Korišćenje i tretman komunalnih i industrijskih otpadnih voda u Republici Srbiji*, May 2015.
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2011. *Popis stanovništva, domaćinstava i stanova 2011. u Republici Srbiji*

- RZS (Republički zavod za statistiku), 2012a. Statistika upravljanja otpadom u Republici Srbiji 2008–2010.
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2012b. Statistika životne sredine, industrijski otpad u Republici Srbiji.
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2013. Popis poljoprivrede 2012. Poljoprivreda u Republici Srbiji
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2015. Statistika otpada u Republici Srbiji 2010–2013.
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2016. Seča drveta u Republici Srbiji 2015.
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2017a. Opštine i regioni u Republici Srbiji, 2016.
- RZS (Republički zavod za statistiku), 2017b. Statistički godišnjak 2016.
- Sabiha-Javied, Mehmood, T., Chaudhry, M.M., Tufail, M., Irfan, N., 2009. Heavy metal pollution from phosphate rock used for the production of fertilizer in Pakistan. *Microchemical Journal* 91: 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2008.08.009>
- Scholz, R.W., Ulrich, A.E., Eilittä, M., Roy, A. 2013. Sustainable use of phosphorus: A finite resource, *Science of The Total Environment*, 461–462, 799–803, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.043>.
- Senthilkumar, K., Alain Mollier, A., Delmas, M., Pellerin, S., Nesme, T., 2014. Phosphorus recovery and recycling from waste: an appraisal based on a French case study. *Resources, Conservation and Recycling* 87: 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.005>
- Senthilkumar, K., Nesme, T., Mollier, A., and Pellerin, S., 2012. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: The case of France. *Global Biogeochem. Cycles* 26, GB2008, <https://doi.org/10.1029/2011GB004102>
- Seyhan, D., 2006. Development of a method for the regional management and long-term use of nonrenewable resources: the case for the essential resource phosphorus. Institute for Water Quality and Waste Management, Vienna University of Technology, Austria.
- SGRS (Službeni glasnik Republike Srbije) 2010. Uredba o odlaganju otpada na deponije ("Sl. glasnik RS", br. 92/2010)
- SGRS (Službeni glasnik Republike Srbije), 2010. Strategija za upravljanje otpadom od 2010. do 2019. godine ("Sl. glasnik RS", br. 29/2010)

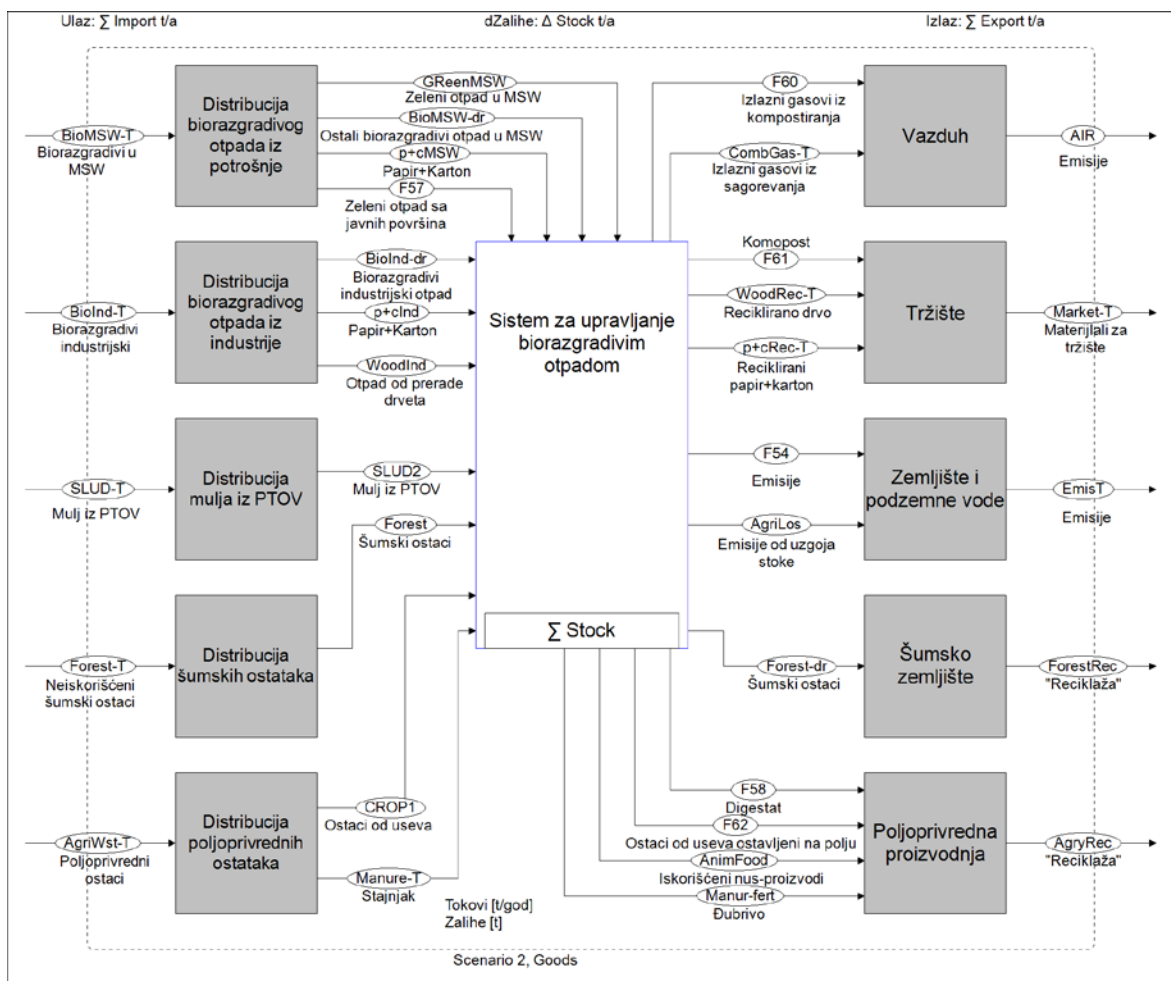
- SGRS (Službeni glasnik Republike Srbije), 2014. Strategija poljoprivrede i ruralnog razvoja Republike Srbije za period 2014-2024. ("Sl. glasnik RS", br. 85/2014)
- SGRS (Službeni glasnik Republike Srbije), 2015. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, ("Sl. glasnik RS", br. 101/2015)
- SGRS (Službeni glasnik Republike Srbije), 2017. Strategija upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije do 2034. godine ("Sl. glasnik RS", br. 3/2017)
- Spellman, F.R., 2014. Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations, Third Edition, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Stanic-Maruna, I.; Fellner, J. 2012. Solid waste management in Croatia in response to the European Landfill Directive Waste Manage. Res. 30 (8) 825– 838 DOI: 10.1177/0734242X12444897
- Stanisavljević, N., 2013, Modelovanje sistema za upravljanje otpadom primenom analize tokova materijala, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- Stanisavljevic, N., Brunner, P. H. 2019. Quantity AND quality: New priorities for waste management. Waste Management & Research, 37(7), 665–666. <https://doi.org/10.1177/0734242X19853677>
- Stanisavljevic, N., Brunner, P.H., 2014. Combination of material flow analysis and substance flow analysis: a powerful approach for decision support in waste management. Waste Management and Research 32(8): 733-744. <https://doi.org/10.1177/0734242X14543552>
- Stanisavljevic, N., Levis, J.W., Barlaz, M.A. 2018, Application of a Life Cycle Model for European Union Policy-Driven Waste Management Decision Making in Emerging Economies. Journal of Industrial Ecology, 22: 341-355. doi:10.1111/jiec.12564
- Stanisavljević, N., Ubavin, D., Batinić, B., Fellner, J., Vujić, G., 2012. Methane emissions from landfills in Serbia and potential mitigation strategies: a case study. Waste Management & Research 30(10): 1,095–1,103. <https://doi.org/10.1177/0734242X12451867>
- Stanisavljevic, N., Vujovic, S., Zivancev, M., Batinic, B., Tot, B., Ubavin, D., 2015. Application of MFA as a decision support tool for waste management in small municipalities—case study of Serbia. Waste Management & Research 33(6): 550–560. <https://doi.org/10.1177/0734242X15587735>

- Stošić, M., Čučak, D., Kovačević, S., Perović, M., Radonić, J., Sekulić, M.T., Miloradov, M.V., Radnović, D., 2016. Meat industry wastewater: microbiological quality and antimicrobial susceptibility of *E. coli* and *Salmonella* sp. isolates, case study in Vojvodina, Serbia. *Water Sci. Technol.* 73(10): 2,509–2,517. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.113>
- Tan, Z., Lagerkvist, A., 2011. Phosphorus recovery from the biomass ash: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3,588–3,602. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.016>
- Tang, J., Brunner, P.H., 2013. Globalising MFA - Decision Support for Waste Management in Cities Based on the Software STAN. https://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=3714
- Tompkins, D., 2006. Organic waste treatment using novel composting technologies. Science Research and Innovation Centre, The University of Plymouth.
- van der Wiel B.Z., Weijma J., van Middelaar C.E., Kleinke M., Buisman C.J.N., Wichern F., 2020. Restoring nutrient circularity: A review of nutrient stock and flow analyses of local agro-food-waste systems, *Resources, Conservation and Recycling* 160, 104901, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104901>.
- Vergara S.E., Tchobanoglous G., 2012. Municipal solid waste and the environment: a global perspective. *Ann. Rev. Environ. Resour.*, 37: 277-310
- Vujic, G., Jovicic, N., Redzic, N., Jovicic, G., Batinic, B., Stanisavljevic, N., Abuhress, O.A., 2010. A fast method for the analysis of municipal solid waste in developing countries—case study of Serbia. *Environmental Engineering and Management Journal* 9: 1,021–1,029.
- Vujic, G., Stanisavljevic, N., Batinic, B., Jurakic, Z., Ubavin, D., 2017. Barriers for implementation of "waste to energy" in developing and transition countries: a case study of Serbia. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19: 55. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0377-8>
- Vujovic, S., Stanisavljevic, N., Fellner, J., Tomic, N., Lederer, J., 2020. Biodegradable waste management in Serbia and its implication on P flows, *Resources, Conservation and Recycling* 161: 104978. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104978>.
- Wei Y., Li J., Shi D., Liu G., Zhao Y., Shimaoka T., 2017. Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review, *Resources, Conservation and Recycling*, 122: 51-65, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.024>.

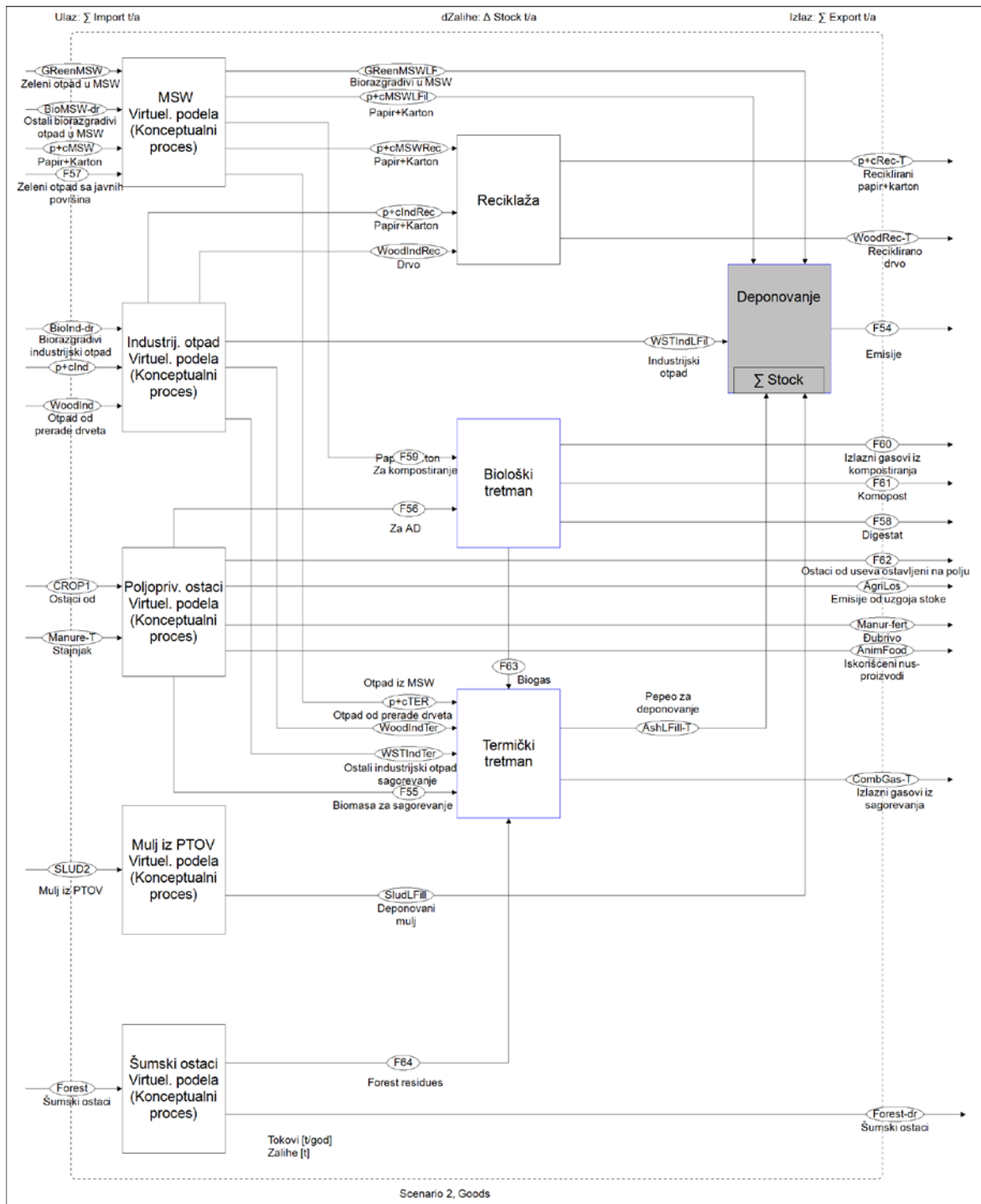
- Yamasue, E., Matsubae, K., Nakajima, K., Hashimoto, S., Nagasaka, T. 2013. Using total material requirement to evaluate the potential for recyclability of phosphorous in steelmaking dephosphorization slag. *Journal of industrial ecology* 17 (5), 722-730
- Zhang, H., He, P.-J., Shao, L.-M., 2008. Implication of heavy metals distribution for a municipal solid waste management system — a case study in Shanghai. *Sci. Total Environ.* 402 (2–3) 257– 267 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.04.047
- Zoboli, O., 2016. PhD thesis—Novel approaches to enhance regional nutrients management and monitoring applied to the Austrian phosphorus case study, Vienna Doctoral Programme on Water Resource Systems, Vienna University of Technology, Austria.
- Zoboli, O., Laner, D., Zessner, M., Rechberger, H., 2015. Added values of time series in material flow analysis: the Austrian phosphorus budget from 1990 to 2011. *Journal of Industrial Ecology* 20(6): 1,334–1,348. <https://doi.org/10.1111/jiec.12381>

7. PRILOZI

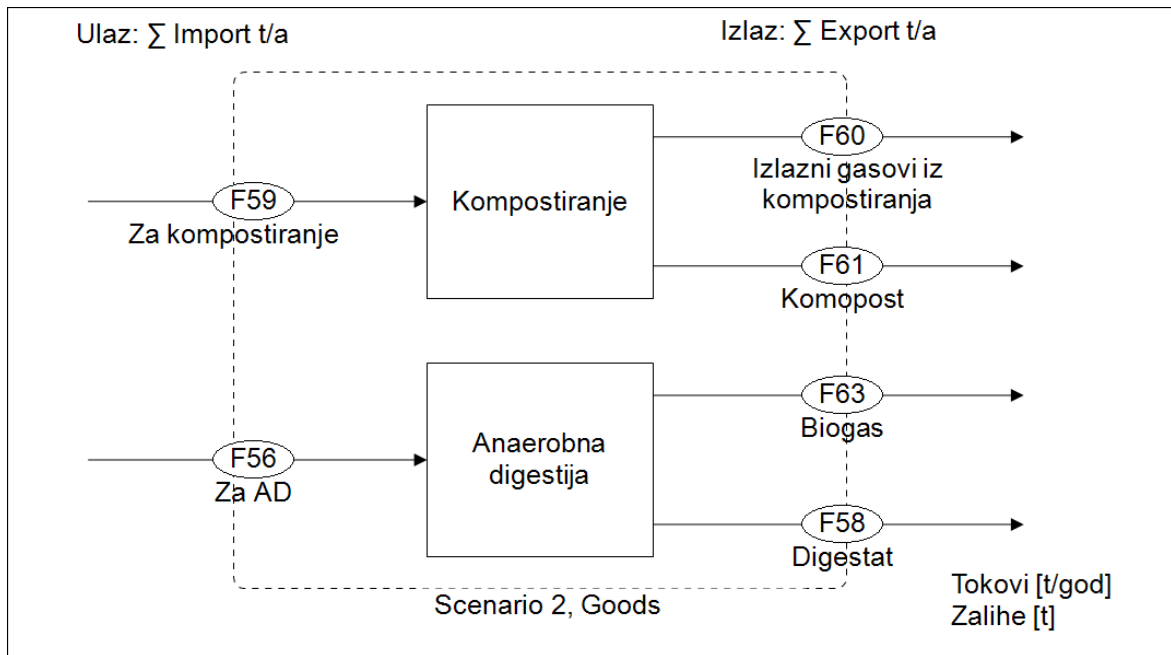
PRILOG 1. MODEL SISTEMA UPRAVLJANJA BIORAZGRADIVIM OTPADOM – SLIKE BEZ VREDNOSTI



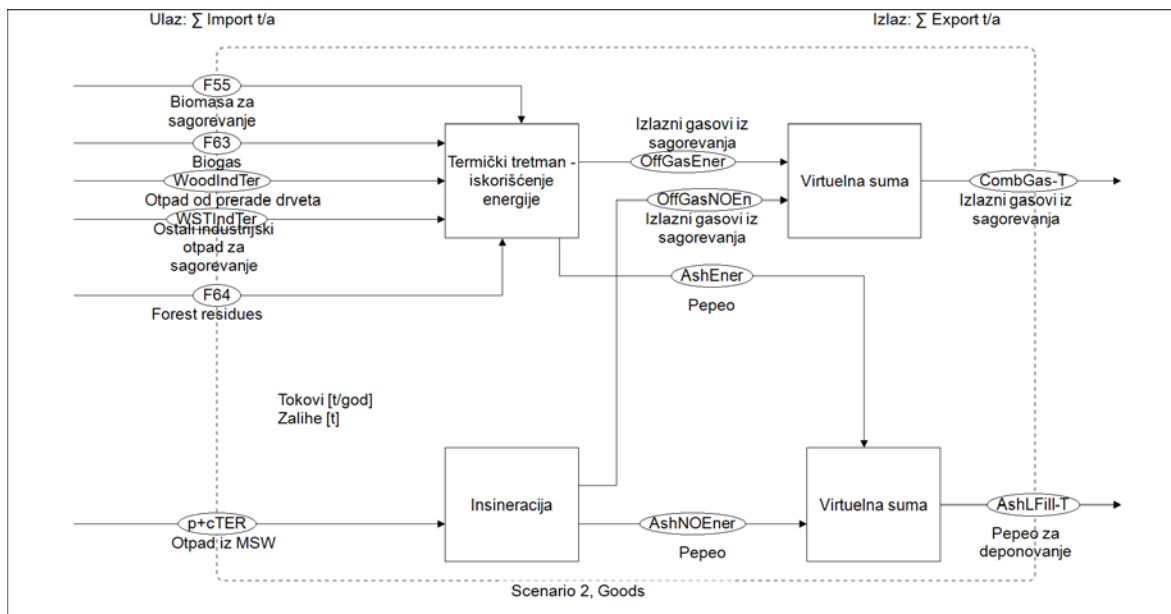
Grafik P1.1 MFA model generisanih tokova biorazgradivog otpada u Srbiji



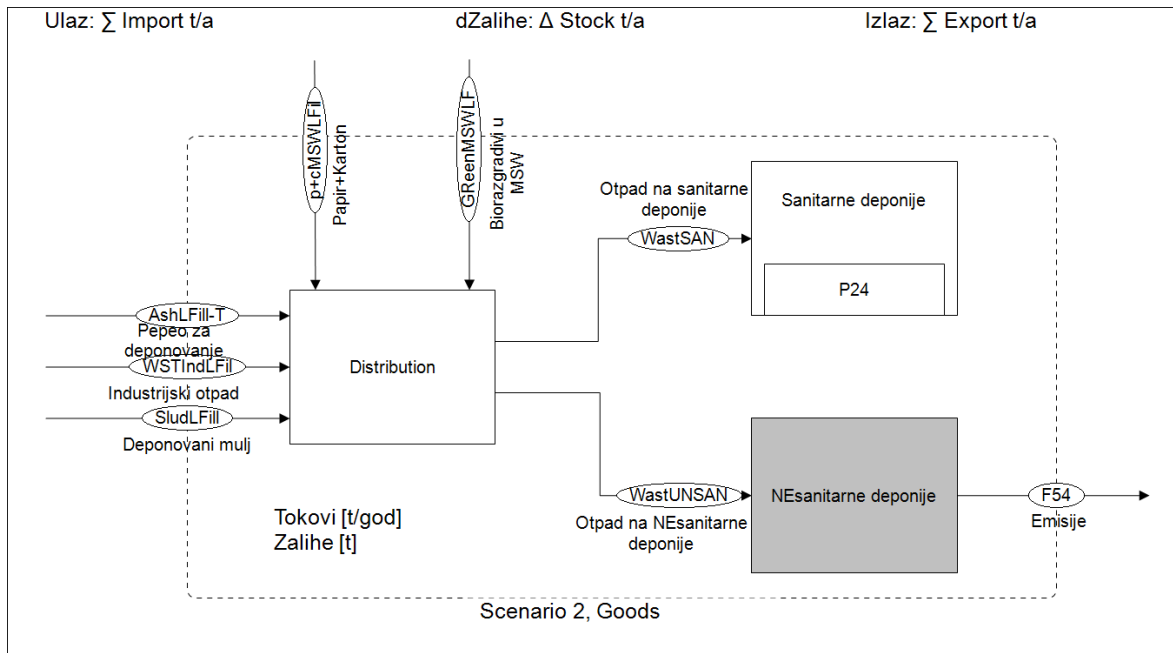
Grafik P1.2 MFA model podсистema upravljanja biorazgradivim tokovima u Srbiji



Grafik P1.3 MFA model podsistema biološkog tretmana



Grafik P1.4 MFA model podsistema termičkog tretmana



Grafik P1.5 MFA model podsistema deponovanja

PRILOG 2. PODACI O SVIM TOKOVIMA MATERIJALA IZ STAN PROGRAMA

Tabela P2.1 Vrednosti svih tokova materijala iz STAN programa – trenutno stanje

Biodegradable waste flows				
Flow name	Mass flow (calculated)	± Mass flow (calculated)	Mass fraction (calculated)	± Mass fraction (calculated)
Reciklaža	21583833 t/a	5697431.30609839 t/a		
Reciklaža	127613 t/a	57425.85 t/a		
Biorazgradivi industrijski otpad	243477.015406541 t/a	32534.4901082944 t/a		
Biorazgradivi industrijski otpad	96158.0070748142 t/a	25947.624123198 t/a		
Biorazgradivi u MSW	1558073.65112166 t/a	199690.872052002 t/a		
Deponovani mulj	1008500 t/a	595015 t/a		
Drvo	6379.9999688552 t/a	1913.19542609328 t/a		
Đubrivo	13441739 t/a	5309525.86853816 t/a		
Emisije	9861159.44032927 t/a	3267854.81620046 t/a		
Emisije	284509.601917518 t/a	107592.340100605 t/a		
Emisije	2440006.44032927 t/a	554513.082962276 t/a		
Emisije od uzgoja stoke	7421153 t/a	3220597.1511493 t/a		
Industrijski otpad	161812.979965846 t/a	32899.3796369586 t/a		
Iskorišćeni nus-proizvodi	1807537 t/a	811702.152973451 t/a		
Izlazni gasovi iz kompostiranja	29783.8021793154 t/a	14308.9346930183 t/a		
Izlazni gasovi iz sagorevanja	254725.799738202 t/a	106637.010825947 t/a		
Komopost	69495.5384184025 t/a	33387.5142837095 t/a		
Materijali za tržište	141043.473327428 t/a	35532.0334740927 t/a		
Mulj iz PTOV	1008500 t/a	595015 t/a		
Mulj iz PTOV	1008500 t/a	595015 t/a		
Neiskorišćeni šumski ostaci	127613 t/a	57425.85 t/a		
Ostaci od useva	8530331 t/a	3656953.49193477 t/a		
Ostaci od useva ostavljeni na polju	6334557 t/a	2776957.74887346 t/a		
Ostali biorazgradivi otpad	773850.818636829 t/a	186701.177528702 t/a		
Ostali biorazgradivi otpad u MSW	773626.085039967 t/a	186736.372824212 t/a		
Ostali industrijski otpad za sagorevanje	3893.99998839791 t/a	1168.01709125927 t/a		
Otpad na NEsanitarne deponije	2440006.44032927 t/a	554513.082962276 t/a		
Otpad na sanitarne deponije	332728.150953991 t/a	75615.4204038889 t/a		
Otpad od prerade drveta	77196.004559674 t/a	21687.0964136818 t/a		
Otpad od prerade drveta	21762.9996376054 t/a	6496.89375549627 t/a		
Papir+karton	15540.8990943334 t/a	4578.72871939585 t/a		
Papir+karton	272483.837733918 t/a	79604.3068317411 t/a		
Papir+Karton	263446.055174113 t/a	77084.217796853 t/a		
Papir+Karton	70123.0037624018 t/a	19940.2603093833 t/a		
Papir+karton	49627.0358449935 t/a	11765.2878136185 t/a		
Pepeo za deponovanje	109168.199887801 t/a	45701.5760682629 t/a		
Poljoprivredni ostaci	29393223 t/a	6040852.47261434 t/a		
Reciklirani papir+karton	65167.9349401705 t/a	12020.4830474878 t/a		
Reciklirano drvo	6379.99996885521 t/a	1913.19542609328 t/a		
Stajnjak	20862892 t/a	6277855.5212492 t/a		
Šumski ostaci	127613 t/a	57425.85 t/a		
Šumski ostaci	127613 t/a	57425.85 t/a		
Tretirani	338237 t/a	152195.590800524 t/a		

Za AD	50000 t/a	37499.8346128391 t/a		
Za kompostiranje	49279.3405977179 t/a	29473.948649601 t/a		
Zeleni otpad	446918.755089963 t/a	124854.964344707 t/a		
Zeleni otpad sa javnih površina	73932.2340262924 t/a	44030.2422329033 t/a		
Zeleni otpad u MSW	447069.276912444 t/a	124853.715898214 t/a		
Phosphorus flows				
Flow name	Mass flow (calculated)	± Mass flow (calculated)	Mass fraction (calculated)	± Mass fraction (calculated)
Reciklaža	44170 t/a	9991.69263427463 t/a	0.00204643911023589 t/t	0.000711412982305956 t/t
Reciklaža	12.7613 t/a	5.742585 t/a	0.0001 t/t	
Biorazgradivi industrijski otpad	309.87950534709 t/a	73.6388231724365 t/a	0.00127272590732917 t/t	0.000323438954094199 t/t
Biorazgradivi industrijski otpad	211 t/a	63.3 t/a	0.0021943050443491 t/t	0.000885411128792101 t/t
Biorazgradivi u MSW	3829.44110770174 t/a	844.635987673275 t/a	0.00245780493428209 t/t	0.0004052193240972 t/t
Deponovani mulj	219 t/a	129.21 t/a	0.000217154189390183 t/t	0.000181190415859423 t/t
Drvo	0.63799999688552 t/a	0.191319542609328 t/a	0.0001 t/t	
Đubrivo	18979 t/a	7773.96621223986 t/a	0.00141194528475817 t/t	0.000803453558006182 t/t
Emisije	9945.95839413171 t/a	2855.6605075803 t/a	0.00100859928838141 t/t	0.00044017215585915 t/t
Emisije	0.869205527560757 t/a	0.50082239268614 t/a	3.05510085319633E-06 t/t	2.03427957466377E-06 t/t
Emisije	3769.95839413171 t/a	755.731650816533 t/a	0.00154506083747179 t/t	0.000416671275561379 t/t
Emisije od uzgoja stoke	6176 t/a	2753.85427339431 t/a	0.000832215694784893 t/t	0.000517821359843993 t/t
Industrijski otpad	242.160658788016 t/a	77.3087110979676 t/a	0.0014965465615869 t/t	0.000519783153561109 t/t
Iskorišćeni nus-proizvodi	5084 t/a	2273.6825363587 t/a	0.00281266718191661 t/t	0.00178259248517053 t/t
Izlazni gasovi iz kompostiranja	0.869205527560757 t/a	0.50082239268614 t/a	2.91838336263331E-05 t/t	1.49009220404042E-05 t/t
Izlazni gasovi iz sagorevanja	0 t/a		-4.04912436045836E-34 t/t	1.69510320001185E-34 t/t
Komopost	86.0513472285148 t/a	49.5814168759278 t/a	0.00123822836957442 t/t	0.000632224835142863 t/t
Materijali za tržište	171.40777826142 t/a	55.7994525118229 t/a	0.00121528330083182 t/t	0.000341948030583077 t/t
Mulj iz PTOV	219 t/a	129.21 t/a	0.000217154189390183 t/t	0.000181190415859423 t/t
Mulj iz PTOV	219 t/a	129.21 t/a	0.000217154189390183 t/t	0.000181190415859423 t/t
Neiskorišćeni šumski ostaci	12.7613 t/a	5.742585 t/a	0.0001 t/t	
Ostaci od useva	25289 t/a	9491.09851347148 t/a	0.002964597739525 t/t	0.00168913897736736 t/t
Ostaci od useva ostavljeni na polju	20107 t/a	8131.02767089677 t/a	0.00317417618943203 t/t	0.00189312038546717 t/t
Ostali biorazgradivi otpad	2710.54792585643 t/a	839.43656828482 t/a	0.00350267501265955 t/t	0.000799625998693226 t/t
Ostali biorazgradivi otpad u MSW	2705.62243895034 t/a	839.355273470689 t/a	0.00349732576418945 t/t	0.000799794145367306 t/t
Ostali industrijski otpad za sagorevanje	0.389399998839791 t/a	0.165195495015501 t/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Otpad na NEsanitarne deponije	3769.95839413171 t/a	755.731650816533 t/a	0.00154506083747179 t/t	0.000416671275561379 t/t
Otpad na sanitarne deponije	514.085235563415 t/a	103.054316019801 t/a	0.0015450608374718 t/t	0.000416671275560544 t/t
Otpad od prerade drveta	7.71960045596739 t/a	3.17279093489356 t/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Otpad od prerade drveta	2.17629996376054 t/a	0.92106548225728 t/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Papir+karton	20.2032840011531 t/a	8.49511992811133 t/a	0.00130000741131636 t/t	0.000389995442568954 t/t

Papir+karton	354.264396997787 t/a	148.710955004899 t/a	0.00130012994511523 t/t	0.000388596446511828 t/t
Papir+Karton	342.446773660858 t/a	143.849898666593 t/a	0.00129987436492277 t/t	0.000388688163480248 t/t
Papir+Karton	91.1599048911223 t/a	37.6812841025402 t/a	0.0013 t/t	0.00039 t/t
Papir+karton	64.5151465995882 t/a	24.6684322189793 t/a	0.0013 t/t	0.00039 t/t
Pepeo za deponovanje	87.5656999626003 t/a	38.2613754654874 t/a	0.000802117283719957 t/t	0.000485199590378463 t/t
Poljoprivredni ostaci	50444 t/a	10079.9953019905 t/a	0.00171617790944532 t/t	0.000491941988778631 t/t
Reciklirani papir+karton	84.7184306007413 t/a	25.6032353364553 t/a	0.00130000176741092 t/t	0.000311216508168885 t/t
Reciklirano drvo	0.63799999688552 t/a	0.191319542609328 t/a	9.99999999999999E-05 t/t	1.77924780149571E-19 t/t
Stajnjak	25155 t/a	9462.61795558605 t/a	0.00120572929198886 t/t	0.00058082198562165 t/t
Šumski ostaci	12.7613 t/a	5.742585 t/a	0.0001 t/t	
Šumski ostaci	12.7613 t/a	5.742585 t/a	0.0001 t/t	
Tretirani	85 t/a	38.2499342258616 t/a	0.000251303080384464 t/t	0.00015992235351718 t/t
Za AD	13 t/a	7.79999944224394 t/a	0.00026 t/t	0.000249721166734379 t/t
Za kompostiranje	73.9205527560755 t/a	49.4711097395206 t/a	0.00150003128815199 t/t	0.000449929599984193 t/t
Zeleni otpad	670.504948090292 t/a	276.309247132549 t/a	0.0015002837550537 t/t	0.00044417243129586 t/t
Zeleni otpad sa javnih površina	110.894880614274 t/a	73.9820613134543 t/a	0.00149995305937646 t/t	0.000449841527779055 t/t
Zeleni otpad u MSW	670.477014476269 t/a	276.309130786782 t/a	0.00149971614937785 t/t	0.000444168479422062 t/t

Tabela P2.2 Vrednosti svih tokova materijala iz STAN programa – scenario 1

Biodegradable waste flows				
Flow name	Mass flow (calculated)	± Mass flow (calculated)	Mass fraction (calculated)	± Mass fraction (calculated)
Reciklaža	25164318.1351862 t/a	8106525488.8668 kg/a		
Reciklaža	127613 t/a	57425850 kg/a		
Biogas	7500 t/a	5625 t/a		
Biorazgradivi industrijski otpad	239391.270197388 t/a	32706182.0515197 kg/a		
Biorazgradivi industrijski otpad	94280.6222092382 t/a	25993.1568785554 t/a		
Biorazgradivi u MSW	1553103.68987667 t/a	243355.395502235 t/a		
Biorazgradivi u MSW	422330.430116295 t/a	81600.9688246363 t/a		
Deponovani mulj	499888.98210125 t/a	214952262.303537 kg/a		
Digestat	42500 t/a	31875 t/a		
Drvo	6388.26460667541 t/a	1913.20740405018 t/a		
Đubrivo	16765486 t/a	7544468.7 t/a		
Emisije	4225644.58587749 t/a	12984814932.0136 kg/a		
Emisije	562107.247326508 t/a	131631196.51508 kg/a		
Emisije	128238.585877486 t/a	23800926.1420999 kg/a		
Emisije od uzgoja stoke	4097406 t/a	12984847.1305082 t/a		
Industrijski otpad	167129.277616305 t/a	33186.349751776 t/a		
Iskorišćeni nus-proizvodi	1807537 t/a	813391.65 t/a		
Izlazni gasovi iz kompostiranja	302061.976505269 t/a	77064623.2832975 kg/a		
Izlazni gasovi iz sagorevanja	260045.270821239 t/a	106717424.915843 kg/a		
Komopost	704811.278512293 t/a	179817454.327694 kg/a		
Materijali za tržište	793627.836073945 t/a	179505903.279202 kg/a		
Mulj	714127.1172875 t/a	307074.660433625 t/a		
Mulj iz PTOV	714127.1172875 t/a	307074.660433625 t/a		
Mulj iz PTOV	714127.1172875 t/a	307074660.433625 kg/a		
Mulj za upotrebu	214238.13518625 t/a	92122.3981300875 t/a		

Doprinos analize tokova fosfora razvoju ciljno orijentisanog upravljanja biorazgradivim otpadom

Neiskorišćeni šumski ostaci	127613 t/a	57425850 kg/a		
Ostaci od useva	8530331 t/a	3838648.95 t/a		
Ostaci od useva ostavljeni na polju	6334557 t/a	2850550.65 t/a		
Ostali biorazgradivi otpad u MSW	765435.024136236 t/a	180588.943087152 t/a		
Ostali industrijski otpad za sagorevanje	3897.07873796116 t/a	1168.01981392804 t/a		
Otpad na NEsanitarne deponije	128238.585877486 t/a	23800926.1420999 kg/a		
Otpad na sanitarne deponije	1154147.27289737 t/a	214208335.278899 kg/a		
Otpad od prerade drveta	75986.0416328578 t/a	21709.7330507812 t/a		
Otpad od prerade drveta paper+cardboard	21859.1652923806 t/a	6497.3713002158 t/a		
Papir+Karton	40117.4839440653 t/a	14110.3522789687 t/a		
Papir+Karton	42310.8090109107 t/a	22401.4688685397 t/a		
Papir+Karton	81589.1957319069 t/a	24509.9936901557 t/a		
Papir+Karton	264705.928938083 t/a	79000.2060730861 t/a		
Papir+Karton	69124.6063552915 t/a	19957.0247600648 t/a		
Pepeo za deponovanje	111447.973209103 t/a	45736039.249647 kg/a		
Poljoprivredni ostaci	29393223 t/a	10142752532.65 kg/a		
Reciklirani papir+karton	82428.2929549759 t/a	18557.9580319111 t/a		
Reciklirano drvo	6388.26460667541 t/a	1913207.40405018 kg/a		
Stajnjak	20862892 t/a	9388301.4 t/a		
Šumski ostaci	127613 t/a	57425.85 t/a		
Šumski ostaci	127613 t/a	57425850 kg/a		
Treated	338237 t/a	152206.65 t/a		
Za AD	50000 t/a	37500 t/a		
Za kompostiranje	1006873.25501756 t/a	256882.077610992 t/a		
Zeleni otpad sa javnih površina	74077.6248345771 t/a	44353.7785855947 t/a		
Zeleni otpad u MSW	448885.111967778 t/a	134067.050282779 t/a		
Phosphorus flows				
Flow name	Mass flow (calculated)	± Mass flow (calculated)	Mass fraction (calculated)	± Mass fraction (calculated)
Reciklaža	47647.079 t/a	13525538.3591855 kg/a	0.00189343811121896 t/t	0.000812984780872384 t/t
Reciklaža	12.7613 t/a	5742.585 kg/a	0.0001 t/t	
Biogas	0 t/a		5.08517931977372E-34 t/t	4.42346778820668E-33 t/t
Biorazgradivi industrijski otpad	308.460592425165 t/a	73503.1617861512 kg/a	0.00128852063891397 t/t	0.00032948439690238 t/t
Biorazgradivi industrijski otpad	211 t/a	63.3 t/a	0.00223799965523907 t/t	0.000911859022053384 t/t
Biorazgradivi u MSW	3390.37385956067 t/a	694471.993733338 kg/a	0.00218296684352729 t/t	0.000340098225810516 t/t
Biorazgradivi u MSW	1595.60889568017 t/a	491130.631010627 kg/a	0.0037781054404268 t/t	0.000960129522357223 t/t
Deponovani mulj	1628.851 t/a	684117.42 kg/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Digestat	13 t/a	7.8 t/a	0.000305882352941177 t/t	0.000293790406188095 t/t
Drvo	0.638826460667541 t/a	191.320740405018 kg/a	0.0001 t/t	
Đubrivo	21745 t/a	9785.25 t/a	0.00129700982124825 t/t	0.000825411995883169 t/t
Emisije	3777.17996330047 t/a	20988207.5838054 kg/a	0.000893870718783157 t/t	0.00567576481574405 t/t
Emisije	16.3292757803811 t/a	6123.08012262912 kg/a	2.90501071780276E-05 t/t	1.00299974568557E-05 t/t
Emisije	367179.963300464 kg/a	84754.9462041622 kg/a	0.00286325649014294 t/t	0.000797169531462082 t/t
Emisije od uzgoja stoke	3410 t/a	20988.0434245906 t/a	0.000832233857225766 t/t	0.00576137992615958 t/t
Industrijski otpad	253.093412434178 t/a	76848.7045857913 kg/a	0.00151435712547762 t/t	0.000499561670246568 t/t
Iskorišćeni nus-proizvodi	5084 t/a	2287.8 t/a	0.00281266718191661 t/t	0.00178997043379868 t/t
Izlazni gasovi iz	16.3292757803811 t/a	6123.08012262912 kg/a	5.40593555312855E-05 t/t	1.36569040729662E-05 t/t

Doprinos analize tokova fosfora razvoju ciljno orijentisanog upravljanja biorazgradivim otpadom

kompostiranja			t/t	t/t
Izlazni gasovi iz sagorevanja	0 t/a		-2.64542081970419E-32 t/t	9.82233235494284E-20 t/t
Komopost	1616.59830225773 t/a	606184.932140281 kg/a	0.00229366122754168 t/t	0.000579442929952994 t/t
Materijali za tržište	1724.55654320081 t/a	605953.454707454 kg/a	0.00217300410193794 t/t	0.000518896708372849 t/t
Mulj	2326.93 t/a	977.3106 t/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Mulj iz PTOV	2326.93 t/a	977.3106 t/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Mulj iz PTOV	2326.93 t/a	977310.6 kg/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Mulj za upotrebu	698.079 t/a	293.19318 t/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Neiskorišćeni šumski ostaci	12.7613 t/a	5742.585 kg/a	0.0001 t/t	
Ostaci od useva	25289 t/a	11380.05 t/a	0.002964597739525 t/t	0.00188665844859759 t/t
Ostaci od useva ostavljeni na polju	20107 t/a	9048.15 t/a	0.00317417618943203 t/t	0.00202003335740544 t/t
Ostali biorazgradivi otpad u MSW	2293.21232614904 t/a	661943.348609864 kg/a	0.002995959492103 t/t	0.000713507209408224 t/t
Ostali industrijski otpad za sagorevanje	0.389707873796116 t/a	165.261015603097 kg/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Otpad na NESanitarne deponije	367.179963300465 t/a	84754.9462041622 kg/a	0.00286325649014294 t/t	0.000797169531462082 t/t
Otpad na sanitarne deponije	3304.61966970418 t/a	762794.51583746 kg/a	0.00286325649014294 t/t	0.000797169531462082 t/t
Otpad od prerade drveta	7.59860416328578 t/a	3147.95421855035 kg/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Otpad od prerade drveta paper+cardboard	2.18591652923806 t/a	923.146323548082 kg/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Papir+Karton	52.1527291272848 t/a	24109.6265839153 kg/a	0.0013 t/t	0.00039 t/t
Papir+Karton	55.1666853551285 t/a	33547.442995614 kg/a	0.00130384378471474 t/t	0.000389955754381893 t/t
Papir+Karton	106.670700487266 t/a	45154.419351795 kg/a	0.00130741208477865 t/t	0.000389835449235153 t/t
Papir+Karton	337.752170372921 t/a	144126.923742299 kg/a	0.00127595241907832 t/t	0.000388264447640656 t/t
Papir+Karton	89.8619882618789 t/a	37414.7553658551 kg/a	0.0013 t/t	0.00039 t/t
Pepeo za deponovanje	87.5756244030342 t/a	38261.4917033475 kg/a	0.00078579826874663 5 t/t	0.000470838609646365 t/t
Poljoprivredni ostaci	50444 t/a	16051239.1442219 kg/a	0.00171617790944532 t/t	0.000805552770590331 t/t
Reciklirani papir+karton	107.319414482413 t/a	33201.7208256589 kg/a	0.0013019730317724 t/t	0.000275853850611643 t/t
Reciklirano drvo	0.638826460667541 t/a	191.320740405018 kg/a	0.0001 t/t	1.23771057199963E-17 t/t
Stajnjak	25155 t/a	11319.75 t/a	0.00120572929198886 t/t	0.000767321422776518 t/t
Šumski ostaci	12.7613 t/a	5742.585 kg/a	0.0001 t/t	
Šumski ostaci	12.7613 t/a	5742.585 kg/a	0.0001 t/t	
Treated	85 t/a	38.25 t/a	0.00025130308038446 4 t/t	0.00015992830104563 t/t
Za AD	13 t/a	7.8 t/a	0.00026 t/t	0.000249721845259881 t/t
Za kompostiranje	1632.92757803811 t/a	612308.012262911 kg/a	0.00162178066593856 t/t	0.000409707122188986 t/t
Zeleni otpad sa javnih površina	110.452728357652 t/a	74057.4699232775 kg/a	0.00149104035941088 t/t	0.000449791617446073 t/t
Zeleni otpad u MSW	648.956634681056 t/a	278018.252955287 kg/a	0.00144570763738682 t/t	0.000442283923296967 t/t

Tabela P2.2 Vrednosti svih tokova materijala iz STAN programa – scenario 2

Biodegradable waste flows				
Flow name	Mass flow (calculated)	± Mass flow (calculated)	Mass fraction (calculated)	± Mass fraction (calculated)
Reciklaža	21156808.4937431 t/a	5455553543.93384 kg/a		
Reciklaža	63806.5 t/a	28712925 kg/a		
Biogas	555507.475693751 t/a	273919.61686758 t/a		
Biomasa za sagorevanje	3684677.34387567 t/a	1817141.50055808 t/a		
Biorazgradivi industrijski otpad	243477 t/a	32738563.2960068 kg/a		
Biorazgradivi industrijski otpad	96158 t/a	26001.7622867801 t/a		
Biorazgradivi u MSW	1550385.74564999 t/a	282804981.873443 kg/a		
Biorazgradivi u MSW	414462.61209266 t/a	82702.5506984002 t/a		
Deponovani mulj	714127.1172875 t/a	307074660.433625 kg/a		
Digestat	3147875.69559792 t/a	1552211.16224962 t/a		
Drvo	6380 t/a	1913.2096701608 t/a		
Đubrivo	13536479.9358341 t/a	5259211.68651724 t/a		
Emisije	4026606.59463831 t/a	1114271362.00238 kg/a		
Emisije	3738390.72517725 t/a	1298789260.44542 kg/a		
Emisije	296764.127564195 t/a	63894236.184988 kg/a		
Emisije od uzgoja stoke	3729842.46707411 t/a	1113312.12177552 t/a		
Forest residues	63806.5 t/a	28712.925 t/a		
Industrijski otpad	161813 t/a	33240.3631590365 t/a		
Iskorišćeni nus-proizvodi	1809250.17270141 t/a	811595.039909379 t/a		
Izlazni gasovi iz kompostiranja	14748.521003368 t/a	8870917.0484715 kg/a		
Izlazni gasovi iz sagorevanja	3723642.20417388 t/a	1298900447.12142 kg/a		
Izlazni gasovi iz sagorevanja	3030753.82369859 t/a	1282135117.69857 kg/a		
Izlazni gasovi iz sagorevanja	692888.380475289 t/a	208019.017150643 t/a		
Komopost	34413.2156745264 t/a	20698806.4464335 kg/a		
Materijali za tržište	105949.181687704 t/a	25769234.4742346 kg/a		
Mulj iz PTOV	714127.1172875 t/a	307074.660433625 t/a		
Mulj iz PTOV	714127.1172875 t/a	307074660.433625 kg/a		
Neiskorišćeni šumski ostaci	127613 t/a	57425850 kg/a		
Ostaci od useva	8492175.37954294 t/a	3645141.919259 t/a		
Ostaci od useva ostavljeni na polju	2663202.68960962 t/a	1321456.76011128 t/a		
Ostali biorazgradivi otpad u MSW	751761.229998836 t/a	231442.714401763 t/a		
Ostali industrijski otpad za sagorevanje	3894 t/a	1168.02032903116 t/a		
Otpad iz MSW	989840.543536127 t/a	297170.024500918 t/a		
Otpad na NESanitarne deponije	296764.127564195 t/a	63894236.184988 kg/a		
Otpad na sanitarne deponije	2670877.14807776 t/a	575048125.664892 kg/a		
Otpad od prerade drveta	77196 t/a	21714.0130392665 t/a		
Otpad od prerade drveta	21763 t/a	6497.46164332748 t/a		
Papir+Karton	15528.9660131782 t/a	4662.29522142584 t/a		
Papir+Karton	81391.8873301306 t/a	24509.996371571 t/a		
Papir+Karton	267878.948139976 t/a	78986.0147920727 t/a		
Papir+Karton	70123 t/a	19960.1948557069 t/a		
Papir+Karton	49627 t/a	14511.4488098346 t/a		
Pepeo	1298894.49587083 t/a	549486479.013671 kg/a		
Pepeo	296952.163060838 t/a	89151.0073502757 t/a		
Pepeo za deponovanje	1595846.65893166 t/a	556671620.194895 kg/a		
Poljoprivredni ostaci	29126835.7803866 t/a	5682242233.06368 kg/a		
Reciklirani papir+karton	65168 t/a	19550.4 t/a		
Reciklirano drvo	6367.96601317824 t/a	24856219.0576911 kg/a		
Stajnjak	20634660.4008437 t/a	6027065.11492469 t/a		
Šumski ostaci	127613 t/a	57425.85 t/a		

Doprinos analize tokova fosfora razvoju ciljno orijentisanog upravljanja biorazgradivim otpadom

Šumski ostaci	63806.5 t/a	28712925 kg/a		
Za AD	3703383.17129168 t/a	1826130.7791172 t/a		
Za kompostiranje	49161.736677895 t/a	29569.723494905 t/a		
Zeleni otpad sa javnih površina	74380.7027574907 t/a	44353.6765419374 t/a		
Zeleni otpad u MSW	456364.864753689 t/a	133997.418950021 t/a		
Phosphorus flows				
Flow name	Mass flow (calculated)	± Mass flow (calculated)	Mass fraction (calculated)	± Mass fraction (calculated)
Reciklaža	35732.2571815659 t/a	8616517.81460775 kg/a	0.00168892473513354 t/t	0.000178782118580156 t/t
Reciklaža	6.38065000000007 t/a	2871.2925 kg/a	9.9999999999982E-05 t/t	8.19463929299578E-19 t/t
Biogas	0 t/a		0 t/t	
Biomasa za sagorevanje	11695.8150906698 t/a	5767.92728390025 t/a	0.00317417618943203 t/t	
Biorazgradivi industrijski otpad	309.8795 t/a	73649.7299872932 kg/a	0.00127272596590232 t/t	0.000323736334155969 t/t
Biorazgradivi industrijski otpad	211 t/a	63.3 t/a	0.0021943052060151 t/t	0.000886237887950922 t/t
Biorazgradivi u MSW	2466.4629782498 t/a	595448.483839973 kg/a	0.00159087052055923 t/t	0.000246375292096124 t/t
Biorazgradivi u MSW	688.927578981817 t/a	228533.617631884 kg/a	0.00166221888025884 t/t	0.000440911811256061 t/t
Deponovani mulj	2326.93 t/a	977310.6 kg/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Digestat	3082.01359895119 t/a	1519.7346951111 t/a	0.000979077287982229 t/t	5.33079349016945E-19 t/t
Drvo	0.638 t/a	191.32096701608 kg/a	0.0001 t/t	
Đubrivo	19112.7690176245 t/a	7425.71914232308 t/a	0.00141194528475817 t/t	
Emisije	3352.50525325658 t/a	18883012.8397525 kg/a	0.000832588228937154 t/t	0.00469181110413499 t/t
Emisije	0.746885600056796 t/a	500.736989551691 kg/a	1.99787998356983E-07 t/t	1.51360428634383E-07 t/t
Emisije	336577.52549231 kg/a	100768.569758261 kg/a	0.00113415839122773 t/t	0.000415428170654628 t/t
Emisije od uzgoja stoke	3015.92772776427 t/a	18882.7439637784 t/a	0.000808593862713489 t/t	0.0050615855935154 t/t
Forest residues	6.38064999999956 t/a	2.8712925 t/a	9.9999999999854E-05 t/t	6.5817261623109E-18 t/t
Industrijski otpad	242.160700000001 t/a	77923.113416867 kg/a	0.00149654663098763 t/t	0.000520042759350929 t/t
Iskorišćeni nus-proizvodi	5084 t/a	2287.8 t/a	0.00281000387713603 t/t	0.0017854579965926 t/t
Izlazni gasovi iz kompostiranja	0.746885600059321 t/a	500.736989551694 kg/a	5.06413897291034E-05 t/t	1.49957801880688E-05 t/t
Izlazni gasovi iz sagorevanja	1.31514414688972E-28 t/a		-1.29851322809343E-30 t/t	2.06223844356819E-19 t/t
Izlazni gasovi iz sagorevanja	0 t/a		0 t/t	
Izlazni gasovi iz sagorevanja	1.31514414688972E-28 t/a		4.56949662095149E-30 t/t	2.44587501942053E-19 t/t
Komopost	73.9416744059623 t/a	49572.9619656178 kg/a	0.00214864182136561 t/t	0.000636249530836615 t/t
Materijali za tržište	159.353323541416 t/a	57110.3797883104 kg/a	0.00150405431172772 t/t	0.000310959601466782 t/t
Mulj iz PTOV	2326.93 t/a	977.3106 t/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Mulj iz PTOV	2326.93 t/a	977310.6 kg/a	0.00325842548710162 t/t	0.00195858207217597 t/t
Neiskorišćeni šumski ostaci	12.7612999999991 t/a	5742.585 kg/a	9.9999999999981E-05 t/t	8.4547865721385E-19 t/t
Ostaci od useva	25289 t/a	11380.05 t/a	0.00297791777368605 t/t	0.00185192727255371 t/t
Ostaci od useva ostavljeni na polju	8453.47456499021 t/a	4194.53658330922 t/a	0.00317417618943203 t/t	
Ostali biorazgradivi otpad u MSW	1426.87880049965 t/a	569937.453038469 kg/a	0.00189804786887169 t/t	0.000559372724451324 t/t
Ostali industrijski otpad za sagorevanje	0.3894 t/a	165.195724188917 kg/a	0.0001 t/t	

Otpad iz MSW	1574.83131418523 t/a	593.432178918917 t/a	0.00159099495819728 t/t	0.000355029088225219 t/t
Otpad na NEsanitarne deponije	336.57752549231 t/a	100768.569758261 kg/a	0.00113415839122773 t/t	0.000415428170654627 t/t
Otpad na sanitarne deponije	16308.7904842858 t/a	5865042.50202961 kg/a	0.00610615523668819 t/t	0.00128944947522723 t/t
Otpad od prerade drveta	7.7196 t/a	3174.63128521949 kg/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Otpad od prerade drveta	2.1763 t/a	921.105547787613 kg/a	0.0001 t/t	3E-05 t/t
Papir+Karton	20.2585491354521 t/a	8583.23107806802 kg/a	0.00130456523108237 t/t	0.000389991778619249 t/t
Papir+Karton	107.756975941279 t/a	45386.1252924244 kg/a	0.00132392772149649 t/t	0.000389774085998578 t/t
Papir+Karton	327.146764746711 t/a	141962.033881081 kg/a	0.00122124850428995 t/t	0.000387545851323587 t/t
Papir+Karton	91.1599 t/a	37699.1155477998 kg/a	0.0013 t/t	0.00039 t/t
Papir+Karton	64.5151000000001 t/a	27027.4242059442 kg/a	0.0013 t/t	0.00039 t/t
Pepeo	11704.7614406698 t/a	5767928.07446004 kg/a	0.00901132576808904 t/t	0.000882998603746695 t/t
Pepeo	1574.83131418523 t/a	593.432178918917 t/a	0.00530331652732427 t/t	0.00118343029408406 t/t
Pepeo za deponovanje	13279.592754855 t/a	5798375.29167618 kg/a	0.00832134634022107 t/t	0.00093395638177776 t/t
Poljoprivredni ostaci	50444 t/a	16051239.1442219 kg/a	0.00173187367073934 t/t	0.000646407365156198 t/t
Stajnjak	25155 t/a	11319.75 t/a	0.00121906537405246 t/t	0.000654007126724526 t/t
Šumski ostaci	12.7612999999981 t/a	5742.585 kg/a	0.0001 t/t	
Šumski ostaci	6.38064999999956 t/a	2871.2925 kg/a	9.9999999999869E-05 t/t	5.90534323653982E-18 t/t
Za AD	3082.01359895119 t/a	1519.7346951111 t/a	0.000832215694784894 t/t	
Za kompostiranje	74.6885600060209 t/a	50073.6989551695 kg/a	0.00151924169187464 t/t	0.00044987340564205 t/t
Zeleni otpad sa javnih površina	109.405661806154 t/a	73320.8347126523 kg/a	0.00147088771348206 t/t	0.000449710159369895 t/t
Zeleni otpad u MSW	603.031751197288 t/a	268517.945374027 kg/a	0.00132138075862339 t/t	0.000438957053792712 t/t

PRILOG 3. OBJAVLJENI REZULTATI ISTRAŽIVANJA

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920302597#bib0055>

Resources, Conservation & Recycling 161 (2020) 104978



Contents lists available at ScienceDirect

Resources, Conservation & Recycling

journal homepage: www.elsevier.com/locate/resconrec



Biodegradable waste management in Serbia and its implication on P flows

Svjetlana Vujovic^a, Nemanja Stanisavljevic^{a,*}, Johann Fellner^b, Nikolina Tomic^a, Jakob Lederer^b



^a University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Environmental Engineering, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia
^b Institute for Water Quality and Resource Management, TU Wien, Karlsplatz 13, 1040 Vienna, Austria

ARTICLE INFO

Keywords:
Phosphorous
Material flow analysis
Biodegradable waste
Transition country
Serbia

ABSTRACT

In a transition country such as Serbia, where the basic principles of waste management have not been fully achieved yet, the management of biodegradable waste (BW) will undergo significant changes due to the rigorous conditions of the intended EU membership. Implementing the requested changes will also affect the flow of Phosphorus (P), which is non-renewable, essential, and with no substitute. In order to be able to develop a resource strategy, a comprehensive analysis of all relevant BW flows and the P contained therein was conducted. In addition, a combination of material flow analysis (MFA) and substance flow analysis (SFA) was used, which has been proven as an effective method for decision making in resource management. The results of the study show that agricultural residues, which account for the largest share of BW, generated (90%) and are one of the largest contributors to P emissions, have the largest potential for resource optimization. Sludge from wastewater treatment plants currently share 3% of the overall BW flow and 0.3% of P flow. The sludge is currently not utilized but represents a flow that the quantity will increase significantly due to the increased capacity and complexity of the planned future wastewater treatment. Total BW and P stock in landfills are low (close to 1% for both). In general, the flows of BW and P are largely linear in Serbia, resources are wasted, and improvement of BW and P management has a great potential to improve environmental quality and contribute to EU's requirements.