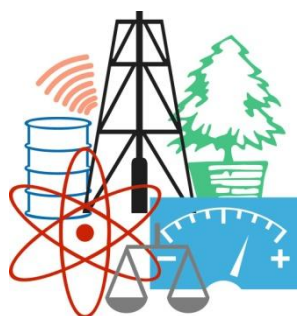


WASTE FORUM



ELECTRONIC PEER-REVIEWED AND OPEN-ACCESS JOURNAL ON
ALL TOPICS OF INDUSTRIAL AND MUNICIPAL ECOLOGY

RECENZOVANÝ ČASOPIS PRO VÝSLEDKY VÝZKUMU A VÝVOJE
Z OBLASTI PRŮMYSLOVÉ A KOMUNÁLNÍ EKOLOGIE

YEAR 2026

No. 1

Pages 1 – 41

Patron of the issue / Patron čísla

ODPADOVÉ FORUM 2026 (21. – 23. 4. 2026, Hustopeče)

Symposium pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii



Czech Environmental Management Center 2026

OBSAH / INDEX

Úvodní slovo šéfredaktora / Editorial	3
Pro autory / For authors	4
Proposal for a new internal processing approach for secondary product from car body surface treatment at the wastewater neutralization station of the automotive paint shop	5
Návrh nového interného postupu spracovania vedľajšieho produktu z povrchovej úpravy karosérie vozidiel na neutralizačnej stanici odpadových vôd automobilovej lakovne	
Martin DROZD, Vratislav KAVALIER	
Vliv provozních parametrů na produkci skleníkových plynů při čištění odpadních vod	16
Effect of operating parameters on greenhouse gas production during wastewater treatment	
Lenka SMETANOVÁ, Josef K. FUKSA, Martina PLECITÁ, Miroslav ČEŠPIVA, Petra ZABLOUDILOVÁ, Josef ZEMAN	
Využití odpadního skla pro částečnou náhradu cementu v cementovém kompozitu podle ČSN EN 196-1	25
Utilization of Waste Glass for Partial Replacement of Cement in Cementitious Composite According to ČSN EN 196-1	
Aleš PALIČKA, Zdeněk PROŠEK	
<i>Pozvánky a nekomerční prezentace / Invitations and non-commercial presentations</i>	
Symposium Výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii	36
ODPADOVÉ FORUM 2026 (21. – 23. 4. 2026, Hustopeče)	
<i>Předběžný program</i>	

WASTE FORUM – recenzovaný časopis pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii
WASTE FORUM – electronic peer-reviewed and open-access journal on all topics of industrial and municipal ecology
ISSN: 1804-0195; www.WasteForum.cz. Vychází čtvrtletně.

Vychází od roku 2008, od roku 2017 je indexován v databázi SCOPUS.

Ročník 2026, číslo 1

Vydavatel: CEMC – České ekologické manažerské centrum, z.s., IČO: 45249741, www.cemc.cz

Adresa redakce: CEMC, ul. 28. pluku 524/25, 101 00 Praha 10, ČR, fax: (+420) 274 775 869

Šéfredaktor: Ing. Ondřej Procházka, CSc., tel.: (+420) 723 950 237, e-mail: prochazka@cemc.cz

Redakční rada: Doc. Bc. Ing. Dana Adamcová, Ph.D.; Ing. Libor Ansorge, Ph.D.; Dr.h.c. mult. prof. Ing. Miroslav Badida, Ph.D.; doc. Ing. Vratislav Bednařík, Ph.D.; doc. Ing. Vladimír Čablík, CSc.; doc. Ing. Vít Černý, Ph.D.; doc. Ing. Hana Doležalová, Ph.D.; doc. Ing. Miroslav Hájek, Ph.D.; Ing. Jiří Hendrych, Ph.D.; prof. Ing. Michal Holubčík, Ph.D.; Ing. Slavomír Hredzák, Ph.D.; doc. Ing. Emília Hroncová, Ph.D.; doc. Ing. Helena Hybská, Ph.D.; prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.; prof. Ing. František Kaštánek, DrSc.; prof. Dr. Ing. Martin Kubal; prof. Ing. Jozef Martinka, Ph.D.; prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.; prof. Norbert Miskolczi; prof. Ing. Lucie Obalová, Ph.D.; doc. Ing. Dušan Oráč, Ph.D.; doc. Ing. Jana Soukopová, Ph.D.; prof. RNDr. Ivona Škultétyová, Ph.D.; doc. Ing. Radovan Šomplák, Ph.D.; prof. Ing. Lubomír Šooš, Ph.D.; Ing. Pavel Švehla, Ph.D.; Ing. Michal Šyc, Ph.D.; prof. Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.; prof. dr. hab. inž. Barbara Tora; doc. Ing. Hana Urbancová, Ph.D. DBA; doc. Ing. Pavla Vrabcová, Ph.D.

Web-master: Ing. Vladimír Študent

Redakční uzávěrka: 8. 1. 2026 Vychází: 12. 3. 2026



Úvodní slovo šéfredaktora

Vážení čtenáři,

říká se „Není každý den je posvícení.“ Platí to i pro tento časopis. V minulém čísle bylo 16 příspěvků a v tomto jen tři. Víím, taková nevyrovnanost nedělá na čtenáře dobrý dojem, ale co nadělám! Nechávat si nějaké články na horší časy? My se ale chlubíme tím, že článek je vystaven do 10 týdnů po redakční uzávěrce! Tak co nadělám...

Z třech článků, co došly do redakce k redakční uzávěrce, jsem jeden musel odmítnout. Přitom došlo k tomu, co nemám rád. Jeden recenzent článek odmítl a druhý měl sice vážné připomínky, ale neodmítl jej. Tak jsem požádal jednu členku redakční rady, aby je rozsoudila. Přiklonila se k tomu přísnějšímu.

Naštěstí jeden příspěvek zbyl z minulého čísla, kdy autoři jej přepracovávali na doporučení recenzentů. Tak jsou tedy alespoň tři.

À propos redakční rada: Začátkem roku jsem se rozhodl rekonstruovat redakční radu tohoto časopisu, neb jsem měl signály, že někteří dosavadní členové již nepůsobí na svém původním pracovišti, případně někdo opakovaně nereagoval na má oslovení. Současně jsem se rozhodl radu doplnit o zástupce dalších fakult a pracovišť, kde se předmětnou problematikou zabývají. Jmenný seznam nové redakční rady najdete jednak v tiráži čísla.

V neposlední řadě vás zvú na symposium ODPADOVÉ FORUM 2026, které je opakovaně patronem tohoto čísla. Díky šťastně zvoleným tématům se letos sešel nadstandardní počet příspěvků (79). Jejich přehled najdete v pizvánce na konci čísla.

Ondřej Procházka

Editorial

Dear readers,

a Czech proverb says: “Not every day is a feast.” This also applies to this journal. In the last issue there were 16 papers and in this one only three. I know, such an imbalance does not make a good impression on the reader, but what can I do! We cannot save some papers for worse times when we boast that the paper is published within 10 weeks after the editorial deadline! Of course, if it passes the review without any problems.

At the beginning of the year, I decided to reconstruct the editorial board of this journal and supplement it with representatives of other faculties and institutes where they deal with the subject matter. You can find the list of names of the new editorial board in the issue's imprint, and a more detailed list with the departments of individual members can be found on the journal's pages under the About Us tab.Regards

Ondřej Procházka

Pro autory

WASTE FORUM je časopis určený pro publikování původních vědeckých prací souvisejících s průmyslovou a komunální ekologií. Tj. nejen z výzkumu v oblasti odpadů a recyklace, jak by mohl naznačovat název časopisu, ale i odpadních vod, emisí, sanací ekologických zátěží atd. Vychází pouze v elektronické podobě a čísla jsou zveřejňována na volně přístupných internetových stránkách www.WasteForum.cz.

Do redakce se příspěvky zasílají v kompletně zalomené podobě se zabudovanými obrázky a tabulkami, tak zvaně „**printer-ready**“. Pokyny k obsahovému členění a grafické úpravě příspěvků spolu s přímo použitelnou **šablonou grafické úpravy** ve WORDu jsou uvedeny na www-stránkách časopisu v sekci [Pro autory](#). Ve snaze dále rozšiřovat okruh možných recenzentů žádáme autory, aby současně s příspěvkem napsali tři tipy na možné recenzenty, samozřejmě z jiných pracovišť než je autor či spoluautory. Je vždy dobré mít rezervu.

Publikační jazyk je čeština, slovenština a angličtina. Preferována je angličtina a v tom případě je nezbytnou součástí článku na konci název, kontakty a abstrakt v českém či slovenském jazyce, přičemž rozsah souhrnu není shora nijak omezen.

Vydávání časopisu není nikým dotované. Proto, abychom příjmově pokryli náklady spojené s vydáváním časopisu, vybíráme publikační poplatek ve výši 1000 Kč za každou stránku (bez DPH). V případě nepublikování příspěvku v důsledku negativního výsledku recenzního řízení je tato částka poloviční.

Uzávěrka nejbližšího čísla časopisu WASTE FORUM je 8. dubna 2026, další pak 8. července 2026.

For authors

WASTE FORUM is an open access electronic peer-reviewed journal that primarily publishes original scientific papers from scientific fields focusing on all forms of solid, liquid and gas waste. Topics include waste prevention, waste management and utilization and waste disposal. Other topics of interest are the ecological remediation of old contaminated sites and topics of industrial and municipal ecology.

WASTE FORUM publishes papers in English, Czech or Slovak. Papers submitted for publication must be the author's own work and may not have been previously published elsewhere or sent to another publisher at the same time. For more, see [Publication Ethics](#).

Manuscripts for publication in the journal WASTE FORUM should be sent only in **electronic form** to the e-mail address prochazka@cemc.cz. Manuscripts must be fully formatted (i.e. printer-ready) in MS WORD. The file should have a name that begins with the surname of the first author or the surname of the corresponding author.

All articles submitted for publication in WASTE FORUM undergo assessment by two independent reviewers. The reviews are dispatched to authors anonymously, i.e. the names of the reviewers are not disclosed to the authors. **The paper, if it is of good quality and passes the review, is published no later than 10 weeks after the editorial deadline.**

All papers that was not subjected to a peer-review are labeled in a header of each page by the text **Invitations and non-commercial presentations**.

Publication of the journal is not subsidized by anyone. Therefore, in order to cover the costs associated with publishing the magazine, we charge a publication fee of CZK 1,000 or 50 USD per page (excluding VAT). If the contribution is not published due to a negative result of the review process, this amount is halved.

The deadline of the next issue is on April 8, 2026, more on July 8, 2026.

Patron of the issue / Patron čísla: Symposium ODPADOVÉ FORUM 2026 (21. – 23. 4. 2026, Hustopeče, Česká republika)

Proposal for a new internal processing approach for secondary product from car body surface treatment at the wastewater neutralization station of the automotive paint shop

Martin DROZD^a, Vratislav KAVALIER^b

^a Institute of Sustainable Regional and Local Development, Faculty of European Studies and Regional Development, Slovak University of Agriculture in Nitra, Trieda Andreja Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovakia, e-mail: xdrozdm@uniag.sk

^b Jaguar Land Rover Slovakia s.r.o., Horné lúky 4540/1, Nitra, Slovakia, e-mail: vkavali@jaguarlandrover.com

Abstract

The study focuses on evaluating a change in the management of secondary product generated in an automotive paint shop during the application of coatings on vehicle bodies, through its treatment in a newly designed technology integrated into the existing operation of the wastewater neutralization station (NS). The proposed technology allows for the separation of secondary product into filtrate ($1,080 \text{ t} \cdot \text{y}^{-1}$) and sludge ($120 \text{ t} \cdot \text{y}^{-1}$), enabling more efficient and environmentally responsible processing directly at the point of origin. Laboratory tests confirmed the effectiveness of FeCl_3 as a coagulant in the separation process, reducing the chemical oxygen demand (COD) concentration from $177,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the original secondary product to $92,360 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the filtrate and further to $616 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the treated wastewater. Compliance with key legislative COD and other pollutant limits was confirmed, as the plant's outlet COD value ($1,200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) remained within the permitted range despite a 100% increase following the addition of filtrate. The implementation of internal waste treatment has eliminated dependence on external end-of-life facilities, resulting in annual cost savings of €227,943 and a reduction in carbon footprint by $26.6 \text{ t CO}_2 \cdot \text{y}^{-1}$, primarily due to decreased reliance on tank truck transport. The integrated technological process comprises pipeline transport, coagulation, neutralization, flocculation, and sludge dewatering. The estimated volume of filtrate, $5.4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, is marginal in comparison to the plant's average daily wastewater volume of $1,453 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. The findings confirm the technology's environmental safety, operational viability, and support for sustainable automotive waste management.

Keywords: automotive paint shop, COD, secondary product, neutralization station, wastewater treatment

Introduction

According to the European Automobile Manufacturers' Association (ACEA¹), waste from car production in the EU increased by 3.8% over an 18-year period, rising from 767,123 tons in 2005 to 795,932 tons in 2023. Waste per vehicle grew by 28.2%, from 67.43 kg to 86.45 kg, reflecting long-term production shifts and external disruptions such as economic crises.

In recent years, the automotive industry in Slovakia has faced growing challenges in industrial waste management. While technological progress and production capacity continue to advance, waste processing lags. As an example, from one Slovak Original Equipment Manufacturer (OEM), the amount of unrecovered waste per vehicle increased from 170 g in 2017 to 12 kg in 2022, indicating a significant decline in environmental efficiency. Simultaneously, the number of companies capable of treating specific waste types has plummeted. Paint sludge processors fell from 4 to 1, washing fluid processors from 3 to 1, and liquid waste handlers from 3 to 1. Most critically, processors of packaging contaminated

with hazardous substances dropped from 4 to 0, leaving no domestic treatment options. Even general waste handlers declined from 4 to 2, with the remaining firms offering only transport abroad, not actual processing. These figures underscore an urgent need to rebuild Slovakia's industrial waste infrastructure and align it with growing sustainability demands in the automotive sector. This situation stems from an unstable regulatory environment and low motivation among waste processors to invest in infrastructure. Given the rising pressure for sustainability from car manufacturers, it is essential to strengthen domestic capacities and implement circular economy principles².

Automobile painting processes produce various types of chemically intensive wastewater from surface treatments like degreasing, activation, passivation, electrophoretic deposition, acid cleaning and alkaline cleaning, resulting in high levels of organics, heavy metals, suspended solids, and low biodegradability³. Zhu⁴ also reported that even after upstream physicochemical steps, automobile painting wastewater still had high COD and poor biodegradability, requiring tailored biological treatment to reach acceptable effluent quality. Automotive paint sludge, a complex waste with about 90% water content, is produced in large quantities worldwide, estimated at 200,000 to 500,000 tons annually, due to the low efficiency of spray painting, where up to half of the paint becomes waste. According to Ruffino⁵, recent research has focused on advanced dewatering methods and recovery strategies, including reuse in coatings, incorporation into construction materials, thermal processes for resource recovery, and biological treatments for detoxification and stabilization. Mohtashami⁶ demonstrated that electro flotation effectively removes 90–97 % of total suspended solids from automotive paint wastewater. Güven⁷ found that adding paint shop wastewater to mainstream wastewater of a bus production factory in a lab-scale SBR (Sequencing Batch Reactor) significantly reduced carbon and nitrogen removal efficiency, inhibited nitrification, and lowered microbial growth rates. According to Salihoglu⁸, automotive manufacturing generates significant hazardous waste, primarily paint sludge from the painting process, classified under EWC (European Waste Catalogue) number 080113. Its composition and disposal depend on paint type, application methods, and chemical additives. Due to high organic content, landfilling is prohibited, with incineration and cement kiln combustion as common disposal routes. Research is ongoing into sludge recycling, composting, and bio gasification, alongside innovations in paint chemistry and application to reduce sludge generation.

This study focused on designing a new technological process to improve the handling of secondary product from car body surface treatment at the wastewater neutralization station (NS) of the automotive paint shop. The material arises as a by-product of the production process; however, due to the need for physico-chemical treatment at the current external end-point facility, it is classified as hazardous waste (EWC 080119). After internal processing using the newly designed process, this material has the potential to lose its waste status (end-of-waste), subject to individual assessment by the competent authority.

This waste is generated during the automotive body coating process in the paint shop and is collected in a storage tank at the Paint Mix Room (PMR) facility. It is a liquid material resulting from the automatic cleaning and flushing of application equipment after the completion of a paint batch. This process is controlled by an automated system that prepares the equipment for the next batch of coating material. The waste is a mixture of the cleaning agent CN 36710 VOC FREE HYDROPURGE (at a concentration of 4%) and residual coating materials used in the paint shop. After flushing, the resulting mixture is transported via pipeline to a storage tank located in the PMR. From there, it is regularly, typically twice a week, removed as waste and sent to a licensed end-of-life waste management facility for final treatment. Due to its specific composition and hazardous properties, this material requires targeted technological processing.

The objective was to replace the existing external end-of-life treatment with an internal processing solution integrated into the wastewater NS at the paint shop of an OEM. The proposed solution involves the integration of a dedicated treatment line comprising a storage tank, three reactors for coagulation, neutralization, and flocculation, a sludge press, a filtrate tank, and a sludge container.

Industrial wastewater entering the NS from paint shop operations includes acidic and alkaline effluents generated during chemical pre-treatment of car bodies, such as degreasing, rinsing, and phosphating, as well as wastewater from cataphoretic painting (electrochemical application of a basic

anti-corrosion coating), oil emulsions, and water contaminated with paint residues. The NS is a dedicated water treatment unit integrated within the paint shop building. It performs physical and chemical treatment of industrial wastewater, which is subsequently discharged into the plant's sewerage system and mixed with sanitary sewage and other wastewater, primarily from vehicle water testing and washing, originating from other areas of the plant. All wastewater is discharged from the plant via a sewage pumping station (PS) into the public sewerage system, ultimately reaching the city's mechanical-chemical-biological wastewater treatment plant (MCB TP). The paint shop generates wastewater at a rate of $46.9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, which is within the design capacity of the NS, rated at $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. The NS treats up to $226,500 \text{ m}^3$ of industrial wastewater annually, contributing to a total maximum discharge of $385,000 \text{ m}^3$ per year from the plant⁹, including both pre-treated industrial effluent and sanitary sewage.

This article aims to test and evaluate a novel technology for treating a secondary product generated in an automotive paint shop, designed for integration into an existing wastewater NS, intending to reduce environmental burden, operating costs, and the carbon footprint of the process. The originality of the study lies in the real-world validation of an integrated treatment approach implemented directly in an operating industrial system. The study provides empirically grounded evidence of the technical, economic, and environmental performance of the solution, thereby offering a transferable model for more sustainable wastewater management in automotive manufacturing. The technology was further validated under semi-operational conditions through a pilot-scale test, confirming its applicability beyond laboratory settings.

Experimental part

To evaluate the feasibility of transitioning the disposal method for liquid waste EWC 080119 (aqueous suspensions containing paints or varnishes with organic solvents or other hazardous substances) from external to internal processing, laboratory testing was conducted. The tests were designed to verify two critical parameters: (a) the effective separation of the solid waste component (sludge) from its liquid phase (filtrate), and (b) the determination of COD in the filtrate to assess its environmental compliance.

A 0.5 L laboratory sample of liquid hazardous waste was treated with 1.25 mL of 40% FeCl_3 under continuous stirring to induce coagulation. The pH was adjusted to a value of 8 using $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Following agitation, the solid phase settled at the bottom of the container. The precipitated sediment was then separated by filtration through filter paper, yielding a distinct sludge and a clear filtrate. The COD in the filtrate was determined using the dichromate oxidation method in accordance with STN ISO 6060. This is a standardized procedure for determining COD. The water sample is oxidized by potassium dichromate in a strongly acidic medium at elevated temperature. The amount of dichromate consumed is proportional to the concentration of oxidizable substances in the sample and expresses the level of organic pollution. The theoretical COD concentration in the plant's wastewater sewerage, following dilution with the filtrate, was subsequently calculated using a mass balance approach (Equation 1).

$$P_3 = \frac{V_1 \cdot P_1 + V_2 \cdot P_2}{V_1 + V_2} \text{ (mg} \cdot \text{L}^{-1}) \quad (1)$$

V_1 – current daily volume (m^3) of wastewater discharged from the plant

V_2 – estimated daily volume (m^3) of filtrate (liquid component after separation from sludge)

V_3 – resulting daily volume (m^3) of wastewater discharged from the plant after mixing with filtrate

P_1 – COD concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in the current reference sample of wastewater at the plant outlet (sewage PS)

P_2 – COD concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in the filtrate

P_3 – COD concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in the plant's wastewater sewerage after mixing with the filtrate

The concentration limits for hazardous substances in the generated waste sludge, as specified in Annex 5 of Act No. 79/2015 Coll.¹⁰, were assessed through analytical testing of both raw sludge (prior to dewatering) and dewatered sludge (after mechanical water removal).

Based on the measured values, the dewatered waste sludge was reclassified to EWC 080113 (sludges from paint or varnish containing organic solvents or other dangerous substances) in accordance with applicable legislation. The average daily volume of wastewater generated by the entire plant (V_1) is 1,453 m³, while the estimated daily production of filtrate (V_2) is 5.4 m³.

As part of the environmental impact assessment, the annual carbon footprint (in tonnes of CO₂) resulting from the transport of liquid waste EWC 080119 from the paint shop to an external end-of-life facility was calculated. Following the implementation of the revised waste handling method, based on internal processing, the carbon footprint was recalculated, reflecting a 90% annual reduction in transport requirements.

The emission factor for diesel fuel (2.54 kg CO₂·L⁻¹) was determined in accordance with STN EN 16258:2013¹¹, a standardized methodology for calculating and declaring energy consumption and greenhouse gas emissions from transport services. The resulting difference between the calculated values led to an overall reduction in the annual carbon footprint.

The economic efficiency of investing in new technology for the treatment of liquid waste EWC 080119 was evaluated using cost-benefit analysis (CBA). The methodology aimed to quantify the difference in waste recovery costs before and after the investment, calculate the payback period, and estimate cost savings over a five-year horizon. The analysis was based on operational and economic parameters associated with car body production and current waste management practices, as outlined in Table 1. The methodology's limitations included the assumption of stable waste recovery prices and a constant volume of waste generation throughout the review period.

Table 1: Operational and economic parameters for CBA

Abbreviation	Parameter	Unit	Value
VK _{1y}	Number of car bodies produced per year	pcs·y ⁻¹	125,000
MO _{1pcs}	Amount of waste generated per car body	t·kg ⁻¹	0.009
MO _{1ys}	Annual waste generation (current situation)	t·y ⁻¹	1,101
I	Investment cost for new technology	€	224,000
MO _{1yi}	Annual waste generation after investment implementation	t·r ⁻¹	120
NO _{1ts}	Recycling cost per ton of waste (current situation)	€·t ⁻¹	334
NO _{1ti}	Recycling cost per ton of waste after investment implementation	€·t ⁻¹	100
NO _{1ys}	Annual recycling cost (current situation)	€·y ⁻¹	367,943
NP _{1yi}	Annual operating cost of the new technology	€·y ⁻¹	20,000
NO _{1yi}	Annual recycling cost after investment implementation	€·y ⁻¹	120,000

Results and discussion

Comprehensive analytical tests of wastewater were conducted at both the NS outlet and the plant outlet (sewage PS), using a reference sample without added filtrate and a sample with added filtrate. The results of these analyses are presented in Tables 2 and 3 of the Results section. The purpose of the analyses was to assess the impact of the filtrate on compliance with wastewater pollution limit values and to verify adherence to the COD limit value as determined by the mass balance method. The results of laboratory tests on the processing of liquid waste EWC 080119, together with analytical tests of wastewater samples, provided the basis for deciding to shift the handling of this waste from external processing to internal continuous treatment. At the same time, they supported the proposal to incorporate new technology into the existing NS facility to enable this treatment.

In standard liquid waste EWC 080119, the COD concentration was measured at $177,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, as confirmed by analytical testing. Analysis of the filtrate sample, following separation of the solid sludge component from waste EWC 080119, revealed a COD concentration of $92,360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Using mass balance equation (Equation 1), the COD concentration at the outlet of the sewage PS, following mixing with sewage wastewater, was calculated to be $616 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. This confirmed theoretical compliance with the COD limit of $1,200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at the plant discharge point.

The effectiveness and suitability of the existing NS technology for pre-treating technology wastewater with added filtrate, along with compliance with pollution limit values at the NS outlet to the site's wastewater sewerage, were evaluated based on sampling and analytical testing of two samples: No. AR-24-KT-032584-01 (collected on 6 September 2024) and No. AR-24-KT-032585-01 (collected on 8 September 2024). The obtained results were averaged and compared with the values of reference sample No. AR-24-KT-030990-01, collected on 25 August 2024, which did not contain the added filtrate. Detailed data are presented in Table 2. The results indicated elevated concentrations of dissolved substances residue (DSR) after annealing at 550°C ($868 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), fluorides ($7.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), and iron (Fe, $0.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) compared to the reference sample. Nevertheless, all samples containing filtrate remained within the established limit values.

Table 2: Effluent quality indicators of technology wastewater at the discharge point from the NS before and after adding the filtrate

Indicator	Effluent reference sample without filtrate [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$] (Protocol No. AR-24-KT-030990-01, 25.8.2024)	Effluent sample 1 with filtrate [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$] (Protocol No. AR-24-KT-032584-01, 6.9.2024)	Effluent reference sample 2 with filtrate [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$] (Protocol No. AR-24-KT-032585-01, 8.9.2024)	Average value from samples 1 and 2 [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	Limit value [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]
Adsorbable organically bound halogens (AOX)	0.05	0.05	0.04	0.05	0.4
Aluminum (Al)	0.43	0.41	0.31	0.36	3
Dissolved substances residue after annealing at 550°C	654	826	910	868	-
Fluorides	5.6	6.82	7.54	7.18	25
Iron (Fe)	0.1	0.59	0.58	0.59	3
Nickel (Ni)	0.02	0.01	0.04	0.03	0.4
Non-polar extractable substances (NEL IS)	0.05	0.31	0.06	0.19	10
pH	7.55	7.4	7.14	7.27	6 – 9
Zinc (Zn)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.6

Compliance with pollution limit values in sewerage wastewater at the plant outlet (PS), including COD, was verified based on sampling and analytical testing of sample No. AR-24-KT-032728-01, collected on 9 September 2024 following the addition of filtrate. The obtained results were subsequently compared with the average parameter values of two reference samples No. AR-24-KT-030076-01 (collected on 14 August 2024) and No. AR-24-KT-031755-01 (collected on 25 August 2024), which did not contain the added filtrate. Detailed results for all pollution indicators are presented in Table 3. The sample containing filtrate exhibited elevated concentrations of COD ($367 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), extractable substances (EL, $7.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), non-polar extractable substances (NEL, $1.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), phosphorus (P, $3.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), and nitrogen (N, $44.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) relative to the average values of the reference samples.

Nevertheless, all monitored parameters remained well within the established limit values, confirming regulatory compliance with a significant safety margin.

Table 3: Effluent quality indicators for sewerage wastewater at the discharge point (PS) of the plant to the external municipal sewerage before and after adding the filtrate

Indicator	Effluent wastewater reference sample 1 without filtrate [mg·L ⁻¹] (Protocol No. AR-24-KT-030076-01, 14.8.2024)	Effluent wastewater reference sample 2 without filtrate [mg·L ⁻¹] (Protocol No. AR-24-KT-031755-01, 25.8.2024)	Average value from samples 1 and 2 [mg·L ⁻¹]	Effluent wastewater sample with filtrate [mg·L ⁻¹] (Protocol. No. AR-24-KT-032728-01, 9.9.2024)	Limit value [mg·L ⁻¹]
Adsorbable organically bound halogens (AOX)	0.094	0.1	0.097	0.11	0.5
Aluminum (Al)	0.55	0.21	0.38	0.28	3
Anionic surfactants (MBAS – Methylene Blue Active Substances)	1.14	0.49	0.82	0.45	10
Chemical oxygen demand (CHSK _{Cr})	342	275	308.5	367	1,200
Dissolved substances residue after annealing at 550°C	1,122	868	995	1.070	1,800
Extractable substances (EL IS – infrared spectroscopy)	3.83	4.05	3.94	7.65	60
Insoluble substances at 105 °C	64	22	43	68	500
Iron (Fe)	0.54	0.27	0.405	0.49	3
Nickel (Ni)	0.016	0.005	0.011	0.014	0.5
Nitrogen (N total)	26.5	35.5	31	44.5	80
Non-polar extractable substances (NEL IS – infrared spectroscopy)	0.44	1.02	0.73	1.58	10
pH	7.95	7.63	7.79	7.7	6 - 9
Phosphorus (P total)	2	2.7	2.35	3.2	15
Zinc (Zn)	0.22	0.1	0.16	0.16	2

The COD concentration (367 mg·L⁻¹) in the sample containing added filtrate was 40.4% lower than the theoretical value calculated via mass balance equation (616 mg·L⁻¹). This discrepancy highlights the significance of residence time in achieving greater dilution of the filtrate within the sewage stream. These results confirm that the proposed change in the handling of waste liquid EWC 080119 at the existing NS facility, consisting of the addition of separate technology for the treatment and separation of waste into filtrate and sludge, is technologically feasible and environmentally safe.

Next, an operational test of internal waste treatment for liquid waste EWC 080119 was conducted. Samples of the resulting raw and dewatered sludge were collected for analytical testing to determine the concentration limits of hazardous substances in accordance with the legislation¹⁰, to assign the appropriate EWC code, and to establish further handling procedures for the residual sludge.

Table 4 presents a comparison of the analytical results. The most pronounced differences between the raw and dewatered sludge samples were observed in the levels of nitrogen, total organic carbon (TOC), water content, and dry matter, as well as in the concentrations of selected metals and organic compounds.

Compared to the raw sludge, the dewatered sludge exhibited markedly higher levels of nitrogen ($14,733 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $2,713 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and TOC (44.2% vs. 7.74%), along with increased dry matter content (64.2% vs. 38.4%) and reduced water content (14.3% vs. 60.6%). Among the analyzed metals, the most pronounced differences were observed in iron (Fe : $16,735 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $54,046 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), aluminum (Al : $3,747 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $2,074 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and nickel (Ni : $10.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $2,826 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Notably, the nickel concentration in both samples remained well below the legislative threshold of $5,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. With respect to organic contaminants, the dewatered sludge exhibited elevated levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs: $1.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $<0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and extractable organic halogen compounds (EOHCs: $14.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $<5.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) compared to the raw sludge.

Table 4: Comparison of analytical results for dewatered and raw sludge (EWC 08 01 13) against regulatory limits for hazardous substances in waste.

Indicator	Unit	Results		Limit value in $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of dry matter (Annex No. 5 to Act No. 79/2015 Coll.)
		Dewatered sludge (Protocol No. 24/02716)	Raw sludge (Protocol No. 24/02719)	
Zinc (Zn)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	38.4	4,391	–
Copper (Cu)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	25.8	26.5	–
Nickel (Ni)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.5	2,826	5,000
Phosphorus (P_{total})	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	136.0	18,298	–
Nitrogen (N_{total})	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	14,733	2,713	–
Dry matter (at 105°C)	%	64.2	38.4	–
Chromium (Cr)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.44	103.5	–
Aluminum (Al)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3,747	2,074	–
Iron (Fe)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16,735	54,046	–
Total organic carbon (TOC)	% by weight	44.2	7.74	–
Water	% by weight	14.3	60.6	–
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.1	<0.5	100
Extractable organic halogen compounds (EOHC)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	14.2	<5.0	100
Benzene	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	<0.1	<0.1	5,000
Toluene	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	<0.1	<0.1	5,000
Phenol index	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.8	0.9	10,000 (phenols)
Mercury (Hg)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	<0.5	<0.5	3,000
Arsenic (As)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	<1.0	<1.0	5,000
Lead (Pb)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.2	9.6	10,000
Cadmium (Cd)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	<0.5	<0.5	5,000

Despite these differences, all monitored parameters remained within legislative limits, confirming the environmental safety of the proposed treatment process for liquid waste EWC code 080119. The results also support the suitability of the dewatered sludge EWC 080113 for final recovery at an external

end-of-life facility. Based on the concentrations of key indicators in the dewatered sludge, it was classified under EWC 080113 (sludge from paint or varnish containing organic solvents or other hazardous substances). End-of-life treatment options for waste classified under EWC 080113 include high-temperature incineration, stabilization and solidification, physico-chemical recovery, and co-incineration in cement kilns, as confirmed by Salihoglu⁸.

Following the successful operational test of internal waste treatment for waste classified under EWC 080119, which resulted in its separation into filtrate and sludge (EWC 080113), a new technological process for continuous treatment was proposed for integration into the existing NS facility. A schematic representation of both the current NS process and the newly proposed treatment technology is shown in Figure 1. The filtrate is directed to the existing NS technology for further treatment, while the dewatered sludge is transported to an end-of-life facility for final recovery.

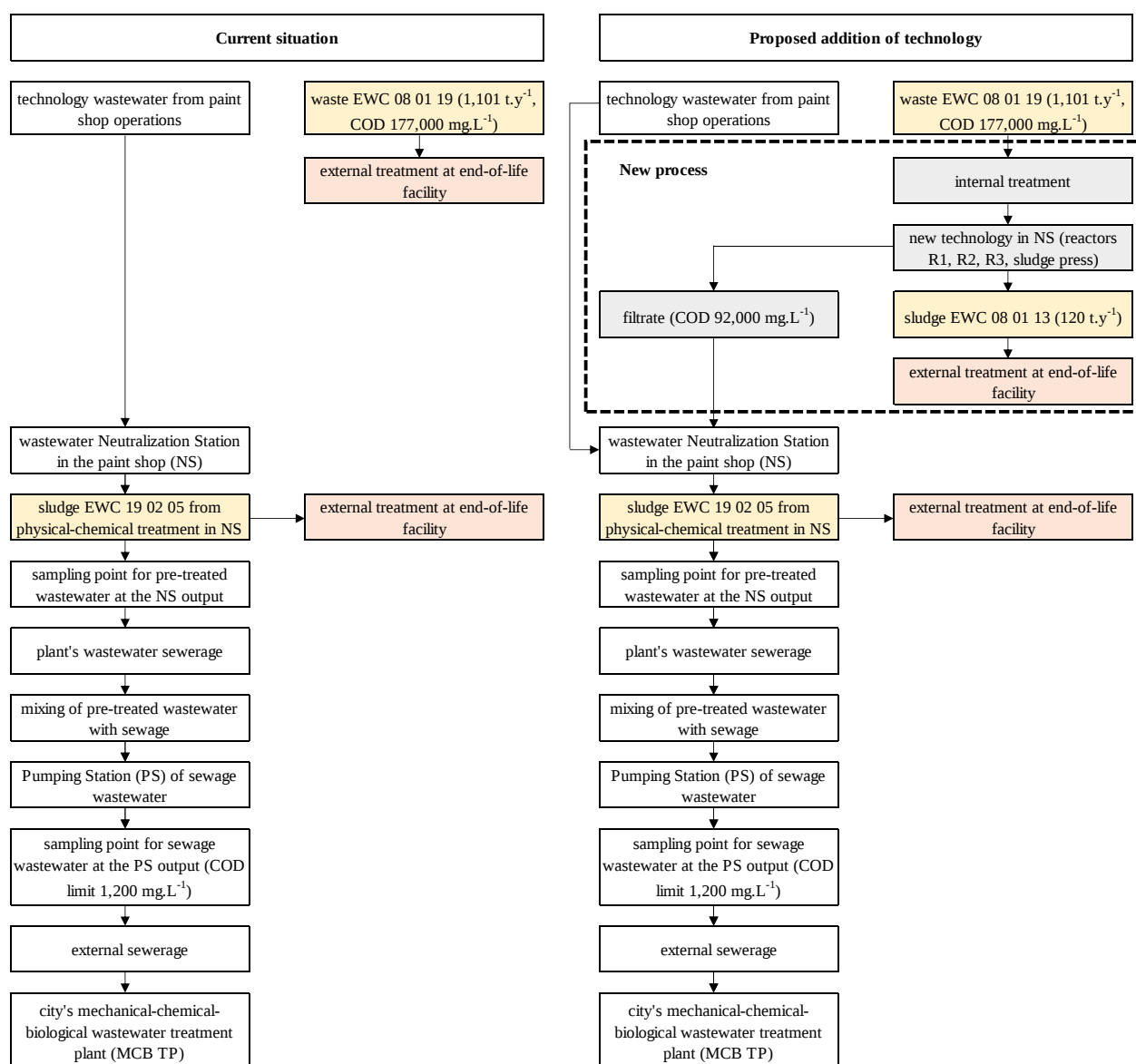


Figure: 1: Scheme of the current and proposed process for treating waste (EWC 080119) at the NS facility

In the first phase of the new process, waste EWC 080119 will be transported via pipeline from the collection tank located in the PMR to the R1 coagulation reactor. An air-operated diaphragm pump will

be connected to the tank, enabling continuous circulation of the material during production downtime and thereby preventing the sedimentation of solid particles.

Following transport, coagulation takes place in reactor R1, where ferric chloride (FeCl_3 , 40%) is applied as a coagulant at a dosing ratio of 1:400. Simultaneously, the pH of the reactor mixture is adjusted to 8 using calcium hydroxide [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. The neutralization process then continues in reactor R2, where calcium hydroxide is added at a concentration of 45%, with continuous stirring to maintain a homogeneous reaction environment.

In the next stage, flocculation occurs in reactor R3 through the addition of a polyelectrolyte-based flocculant and continuous mixing, which facilitates the formation of larger particle aggregates and their subsequent separation. Once the chemical reactions are complete, the treated mixture is transferred via a peristaltic pump to a dewatering unit, a sludge press, where the liquid phase is reduced and separated from the solid sludge.

The sludge is conveyed by gravity into a designated container, while the filtrate is simultaneously drained into a holding tank. From there, it is pumped by a centrifugal pump into the BV 165 neutralization tank for further treatment. The BV 165 neutralization tank is part of the existing NS technology, where the filtrate is treated together with other wastewater streams generated by paint shop operations. This integrated approach enables the efficient incorporation of the processing and treatment of waste classified under EWC 080119 into the main technological system. The entire process will be carried out during the standard three-shift operation in the paint shop, as this type of waste is generated exclusively during manufacturing activities.

To assess the economic efficiency of the proposed solution, a CBA was conducted. The annual car body production (VK_{1y}) is 125,000 units, with an average waste generation per car body ($\text{MO}_{1\text{pcs}}$) of 0.009 tons. This means that the total annual waste production ($\text{MO}_{1\text{ys}}$) amounts to 1,101 tons. Currently, the cost of treatment per ton of waste ($\text{NO}_{1\text{ts}}$) is € 334, which, given the above volume, represents an annual cost ($\text{NO}_{1\text{ys}}$) of € 367,943. The proposed investment (I) amounts to € 224,000, with estimated annual operating costs ($\text{NP}_{1\text{yi}}$) of € 20,000. Following implementation, solid waste sludge ($\text{MO}_{1\text{ri}}$) will continue to be generated at an approximate volume of 120 tons per year. The cost of energy recovery one ton of sludge ($\text{NO}_{1\text{ti}}$) is estimated at € 100, resulting in a reduction of the annual waste recycling cost ($\text{NO}_{1\text{yi}}$) by € 247,943 from the original amount to € 120,000.

The calculation procedure involved determining the new annual costs following the investment, calculated as the sum of the annual waste recovery costs after implementation ($\text{NO}_{1\text{ri}}$) and the operating costs of the new technology ($\text{NP}_{1\text{yi}}$), resulting in a total of € 140,000.

Annual cost savings were calculated as the difference between the original waste management costs ($\text{NO}_{1\text{ys}}$) and the post-investment costs ($\text{NPO}_{1\text{yi}}$), resulting in a total savings of € 227,943. The return on investment (ROI) was calculated as the ratio between the investment amount (I) and the annual cost savings (€ 227,943), resulting in a payback period of approximately 0.98 years. The estimated total savings over a five-year period were determined by multiplying the annual savings by five (€ 227,943 × 5) and subtracting the initial investment, yielding a net benefit of € 915,715.

Based on operational data, the carbon footprint associated with the transport of waste EWC 080119 by a 10 m³ tanker truck was calculated¹¹. Under the original conditions – 104 turns per year and a total distance of 38,896 km, fuel consumption amounted to approximately 11,669 L of diesel, based on an average consumption of 30 liters per 100 km. Using an emission factor¹² of 2.54 kg CO₂ L⁻¹ the total annual transport-related carbon footprint was estimated at 29.6 t CO₂. With the implementation of new internal waste treatment technology, the frequency of waste collection will be reduced by 90%, resulting in a decrease in total distance travelled to 3,890 km, fuel consumption to 1,167 L, and annual emissions to approximately 3 t CO₂, as presented in Table 5.

Table 5: Calculation of carbon footprint reduction

Parameter	Unit	Original state	After project implementation	Reduction
Tank truck turns	turns·y ⁻¹	104.0	10.4	90 %
Distance to end point facility	km·y ⁻¹	38,896.0	3,890.0	90 %
Diesel consumption	L·y ⁻¹	11,668.8	1,166.9	90 %
CO ₂ emissions	t·y ⁻¹	29.6	3.0	90 %

Conclusions

Automotive painting processes generate chemically intensive wastewater and large volumes of paint sludge, both characterized by high organic loads, poor biodegradability, and complex treatment requirements. Recent research highlights the need for advanced separation, recovery, and detoxification technologies to meet environmental standards and reduce the impact of hazardous waste.

The study demonstrated that the proposed technology for the internal treatment of liquid hazardous waste EWC 080119 offers an effective, environmentally sound, and operationally viable solution for implementation within the automotive plant. Separating waste into filtrate and sludge using the proposed new technology will enable further direct processing of the filtrate in the existing NS plant. This will significantly eliminate dependence on external end-of-life facilities, reduce operating costs, and reduce the plant's carbon footprint. Laboratory tests confirmed the effectiveness of FeCl₃ in the separation process, with the resulting concentrations of COD and other pollutants in both sludge and wastewater meeting legislative limits, thereby demonstrating the environmental acceptability of the proposed solution. The marginal proportion of filtrate relative to the total wastewater volume further confirms that integrating the new process into the existing neutralization technology does not pose an operational burden. Overall, the introduction of the proposed technology enhances the sustainability of waste management within the automotive plant and offers a replicable model for similar industrial operations aiming to minimize environmental impacts and optimize waste economy.

Acknowledgment

No funding was provided for this study.

References

1. <https://www.acea.auto/figure/waste-from-car-production-in-eu/>, downloaded 12. 9. 2025.
2. <https://www.odpady-portal.sk/Dokument/108080/automobilovy-priemysel-odpady-spracovanie.aspx>, downloaded 12. 9. 2025.
3. Dey, B. K., Hashim, M. A., Hasan, S., Gupta, B. S.: Adv. Environ. Res. 8(3–4), 455 – 466 (2004). doi: 10.1016/S1093-0191(02)00122-3.
4. Zhu, Y., Zhu, T., Groetzbach, M., Han, H., Ma, Y.: Water 9(11), 881 (2017). doi: 10.3390/w9110881.
5. Ruffino, B., Campo, G., Idris, S. S., Salihoglu, G., Zanetti, M.: Resources 12(4), 45 (2023). doi: 10.3390/resources12040045.
6. Mohtashami, R., Shang, J. Q., Xu, Y.: Environ. Processes 5, 577 – 591 (2018). doi: 10.1007/s40710-018-0324-5.
7. Güven, D., Hanhan, O., Aksoy, E. C., Insel, G., Çokgör, E.: J. Hazard. Mater. 330, 61 – 67 (2017). doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.01.048.
8. Salihoglu, G., Salihoglu, N. K.: J. Environ. Manage. 169, 223 – 235 (2016). doi: 10.1016/j.jenvman.2015.12.039.

9. Slovenská inšpekcia životného prostredia. Integrované povolenie č. 5702-20834/2023/Čás/375180116/Z9 [online]. Bratislava: SIŽP, 2023 [cit. 2025-09-07]. Dostupné na: <https://www.sizp.sk/ipkz/integrované-povolenia?idpr=3321&idprev=5672>
10. Zákon č. 79/2015 Z. z. o odpadoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov (Príloha č. 5). Zbierka zákonov Slovenskej republiky 2015, čiastka 27/2015, str. 185.
11. ISO 14083:2023 Greenhouse gases – Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations (Edition 1, 2023).
12. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>, downloaded 11. 9. 2025.

Návrh nového interného postupu spracovania vedľajšieho produktu z povrchovej úpravy karosérie vozidiel na neutralizačnej stanici odpadových vôd automobilovej lakovne

Martin DROZD^a, Vratislav KAVALIER^b

^a Ústav udržiavateľného regionálneho a miestneho rozvoja, Fakulta európskych štúdií a regionálneho rozvoja, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Trieda Andreja Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovakia, e-mail: xdrozdm@uniag.sk

^b Jaguar Land Rover Slovakia s.r.o., Horné lúky 4540/1, Nitra, Slovakia, e-mail: vkavali@jaguarlandrover.com

Abstrakt

Štúdia sa zameriava na hodnotenie zmeny spôsobu nakladania s vedľajším produktom vznikajúcim v automobilovej lakovni počas aplikácie náterových hmôt na karosérie vozidiel, a to prostredníctvom jeho spracovania v novonavrhnutej technológii integrovanej do existujúcej prevádzky neutralizačnej stanice odpadových vôd (NS). Navrhovaná technológia umožňuje separáciu vedľajšieho produktu na filtrát (1 080 t·rok⁻¹) a kal (120 t·rok⁻¹), čím sa dosahuje efektívnejšie a environmentálne zodpovednejšie spracovanie priamo v mieste vzniku.

Laboratórne testy potvrdili účinnosť chloridu železitého (FeCl₃) ako koagulantu v separačnom procese, pričom koncentrácia chemickej spotreby kyslíka (CHSK) sa znížila z 177 000 mg·L⁻¹ v pôvodnom vedľajšom produkte na 92 360 mg·L⁻¹ vo filtráte a následne na 616 mg·L⁻¹ vo vyčistenej odpadovej vode. Súlad s legislatívnymi limitmi pre CHSK a ďalšie znečisťujúce látky bol potvrdený, keďže hodnota na výstupe z prevádzky závodu (1 200 mg·L⁻¹) zostala v povolených medziach aj napriek 100% nárastu po pridaní filtrátu v prípade CHSK. Zavedenie procesu interného spracovania vedľajšieho produktu eliminovalo závislosť od externých zariadení na konečné zneškodňovanie, čo viedlo k ročnej úspore nákladov vo výške 227 943 € a k zníženiu uhlíkovej stopy o 26,6 t CO₂·rok⁻¹, predovšetkým v dôsledku obmedzenia prepravy cisternovými vozidlami. Integrovaný technologický proces zahŕňa potrubnú dopravu, koaguláciu, neutralizáciu, flokuláciu a odvodňovanie kalu. Odhadovaný objem filtrátu 5,4 m³·deň⁻¹ je zanedbateľný v porovnaní s priemerným denným objemom odpadových vôd závodu, ktorý predstavuje 1 453 m³·deň⁻¹. Výsledky potvrdili environmentálnu bezpečnosť technológie, jej prevádzkovú realizovateľnosť a prínos pre udržiavateľné nakladanie s odpadovými medziproduktmi v automobilovom priemysle.

Kľúčové slová: automobilová lakovňa, chemická spotreba kyslíka (CHSK), vedľajší (sekundárny) produkt, neutralizačná stanica, čistenie odpadových vôd

Vliv provozních parametrů na produkci skleníkových plynů při čištění odpadních vod

Lenka SMETANOVÁ^a, Josef K. FUKSA^a, Martina PLECITÁ^a, Miroslav ČEŠPIVA^b, Petra ZABLOUDILOVÁ^b, Josef ZEMAN^b

^a Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6, e-mail: lenka.smetanova@vuv.cz

^b Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v.v.i., Drnovská 507/73, 161 00 Praha 6

Souhrn

Čistírny odpadních vod (ČOV) jsou primárně navrhovány a provozovány tak, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality odtoku vyčištěné odpadní vody, přispívají ke snížení znečištění recipientů, jsou ale také zdrojem plyných emisí do atmosféry. V současné době se (i v souvislosti s novou evropskou směrnicí o čištění městských odpadních vod) pozornost obrací k tomu, aby ČOV byly udržitelné i z hlediska dalších dopadů na životní prostředí. Jedním z aspektů je produkce skleníkových plynů. Emise spojené s čištěním odpadních vod vznikají při výrobě elektrické energie spotřebovávané při nakládání s odpadními vodami a dalších energií (nepřímé emise) a při samotných procesech čištění odpadních vod – přirozeně probíhajících i intenzifikovaných (přímé emise). V tomto příspěvku se zabýváme vlivem provozních parametrů na přímé emise oxidu uhličitého, oxidu dusného a metanu vznikající při čištění komunálních odpadních vod a uvádíme výsledky měření vybraných skleníkových plynů nad volnou hladinou aktivací nádrže domovní čistírny odpadních vod.

Klíčová slova: čištění odpadních vod, emise, skleníkové plyny, N_2O , organické zatížení, zatížení dusíkem

Úvod

Nadměrné uvolňování skleníkových plynů do atmosféry je hlavní příčinou globálního oteplování. Mezi nejvýznamnější skleníkové plyny patří vodní pára, oxid uhličitý (CO_2), metan (CH_4) a oxid dusný (N_2O). K porovnání toho, kolik tepla v atmosféře jednotlivé plyny zachytí, resp. jak silné skleníkové plyny to jsou, slouží ukazatel GWP (Global Warming Potential). GWP udává poměr tepla zachyceného jednotkou hmotnosti plynu ve srovnání s jednotkou hmotnosti CO_2 během daného období setrvání v atmosféře (typicky 100 let) - jeho hodnota určuje, kolikanásobně daný plyn přispívá ke skleníkovému efektu více než oxid uhličitý¹. Hodnota GWP pro oxid dusný 273, resp. 27 pro metan tedy znamená, že 1 kg oxidu dusného (N_2O) má stejný účinek jako 273 kg oxidu uhličitého (CO_2e) a 1 kg metanu (CH_4) jako 27 kg oxidu uhličitého (CO_2e)². Odhaduje se, že nakládání s odpadními vodami a kaly představuje 1,3 % globálních emisí skleníkových plynů³.

Provoz čistíren odpadních vod generuje dva hlavní typy emisí – přímé a nepřímé. Přímé emise pocházejí přímo z (biologických) procesů probíhajících v čistírně – od primárního čištění přes dosazovací nádrže až po zpracování kalů. K emisím plynů dochází navíc již při transportu odpadní vody v kanalizační síti a také po vypuštění vyčištěné odpadní vody do recipientu. Nepřímé emise vznikají spotřebou externích zdrojů, zejména při výrobě elektřiny nutné pro provoz, ale i dopravou a produkcí potřebných chemikálií atd. Zatímco nepřímé emise se dají určit relativně snadno, přesné vyčíslení přímých emisí je komplikované a zatížené značnou nejistotou – určení podílu přímých a nepřímých emisí na celkové uhlíkové stopě ČOV je tudíž také nejisté. Některé práce uvádějí, že přímé emise z kanalizací a bioreaktorů (zejména emise N_2O a CH_4 jako silných skleníkových plynů) mohou tvořit velkou část uhlíkové stopy ČOV až 60 – 78 %^{4,5,6,7}. Jiné odhady uvádějí, že nepřímé emise spojené se spotřebou elektrické energie činí 38 – 50 % celkových emisí ČOV⁸.

V České republice je přibližně 82 % obyvatel napojeno na veřejnou kanalizaci, 98 % veškeré odkanalizované komunální odpadní vody je pak čištěno na čistírnách odpadních vod⁹. Proces čištění začíná již samovolně probíhajícími anaerobními a aerobními procesy v kanalizační síti¹⁰. V ČOV dochází k intenzifikované degradaci organických látek pomocí směsné kultury mikroorganismů (aktivovaného kalu) v aktivačních nádržích nebo jiných reaktorech za kontrolovaných podmínek (míchání, provzdušňování). Při těchto degradačních procesech jsou produkovány a emitovány plyny, především oxid uhličitý, ale z hlediska klimatické stopy jsou zásadní oxid dusný a metan.

Oxid uhličitý, který vzniká přímo během čištění komunálních odpadních vod a energetického využívání kalového plynu, je standardně považován za biogenní - je součástí přirozeného uhlíkového cyklu a potravního řetězce, a proto není zahrnován do celkových emisních inventur skleníkových plynů^{2,11}. Navzdory tomuto přístupu je sledování celkové produkce CO₂ nezbytné pro komplexní uhlíkovou bilanci celého procesu, což bylo zohledněno i během našich měření.

Produkce CO₂ závisí zejména na množství a koncentraci čištěné odpadní vody (látkové zatížení vyjádřené jako biologická nebo chemická spotřeba kyslíku, BSK nebo CHSK) a na stáří kalu udržovaném v systému¹². Zatímco v biologickém stupni vzniká CO₂ převážně aerobní respirací, v kalovém hospodářství je jeho zdrojem anaerobní fermentace a následné spalování bioplynu. Kalové hospodářství zároveň představuje majoritní zdroj metanu, jehož produkce je výhradně spojená s anaerobním rozkladem organické hmoty a kromě koncentrace rozložitelného substrátu je přímo ovlivňována procesní teplotou, hodnotou pH a oxidačně-redukčními podmínkami¹⁰. Na rozdíl od emisí z otevřených biologických stupňů, které nekontrolovaně unikají do atmosféry, představuje kalové hospodářství s uzavřenými vyhnívacími nádržemi kontrolovatelný systém. Vznikající bioplyn, tvořený primárně metanem a oxidem uhličitým, lze v těchto zařízeních efektivně zachycovat a případně následně energeticky využívat.

V komunálních ČOV je 90 % oxidu dusného emitováno z aktivačních nádrží¹¹. N₂O vzniká při mikrobiální transformaci sloučenin dusíku jak při nitrifikaci, tak při denitrifikaci¹³. Produkce a emise N₂O závisí na technologickém uspořádání ČOV a úzce souvisí s provozními podmínkami (poměr koncentrace C:N, resp. CHSK:N, pH, koncentrace rozpuštěného kyslíku)^{14,15}.

Intenzivní aerace biologických reaktorů (aktivačních nádrží) na ČOV podporuje kal ve vznosu a udržuje celkově oxidativní podmínky, ale také vede k významnému zvýšení celkových emisí plynů v důsledku jejich strippování. Z provzdušňovaných nádrží jsou pak emitovány i plyny, které vznikají v předcházejících technologických krocích^{16,17}.

Snížit plynné emise z otevřených nádrží čistíren odpadních vod lze v zásadě dvěma způsoby: i) zachovat stávající technologie a uspořádání a buď upravit provozní podmínky tak, aby byly emise redukovány nebo vznikající plyny zachycovat a případně využívat nebo ii) změnit uspořádání ČOV nebo zavést nové procesy, při kterých se produkuje menší množství plynů¹⁸.

Z hlediska investičních nákladů představuje úprava provozních podmínek stávajících technologií výhodnější řešení. Obecně se ke snížení produkce (emisí) skleníkových plynů doporučuje provozovat biologické čištění s vyššími hodnotami stáří kalu – snižuje se produkce N₂O, na druhé straně vzrůstá produkce CO₂, ale zároveň klesá celkové množství produkovaného kalu, takže se snižuje celková produkce CH₄. Dále - zejména pro kontrolu emisí N₂O - je to udržování vhodných podmínek při denitrifikaci a nitrifikaci (kyslíkové poměry, vhodný poměr CHSK:N). Preferovány jsou velké objemy aktivačních nádrží, systém tak lépe odolává náhlým změnám koncentrací a průtoku čištěné odpadní vody. Zachycování a následné čištění plyných emisí z ČOV je spojeno s vysokými investičními i provozními náklady. Účinná a dostupná technologie pro tuto aplikaci zatím neexistuje – jedná se o směs různých plynů s poměrně nízkými koncentracemi¹⁹.

Předmětem výzkumu jsou nové technologie čištění odpadních vod s nižší emisní stopou. Pro daný účel se zdá být perspektivní použití parciální nitrifikace v kombinaci s anaerobní oxidací amoniaku (Anammox procesy) nebo využití řas^{20,21}. Zavedení těchto technologií do praxe však naráží na specifické požadavky – např. stabilizaci přítoku (kvantitativní i kvalitativní) na ČOV v případě použití Anammox nebo vysoké nároky na plochu při aplikaci řas.

Experimentální část

Cílem experimentů bylo měřit emise oxidu uhličitého, oxidu dusného a metanu nad volnou hladinou aktivační nádrže čistírny odpadních vod a naměřená data vyhodnotit s ohledem na provozní podmínky. V experimentech jsme sledovali vliv teploty, intenzity provzdušňování a množství a koncentrace odpadní vody. Dále se v tomto příspěvku budeme podrobněji zabývat vlivem koncentrace odpadní vody na produkci CO_2 , N_2O a CH_4 .

Měření jsme prováděli na typové domovní čistírně odpadních vod dimenzované pro cca 6 – 10 ekvivalentních obyvatel (EO) s kapacitou 1 200 litrů za den. Jednalo se o blokovou čistírnu s odděleným usazovacím prostorem, provzdušňovanou aktivační nádrží a odděleným dosazovacím prostorem. Odpadní voda byla přiváděna do usazovacího prostoru, mechanicky předčištěná odpadní voda natékala přepadem do aktivačního prostoru. Aktivace byla provzdušňována jemnobublinnou aerací. Aktivační směs byla následně odváděna do vertikálně osazené dosazovací nádrže a odtud čerpána do odtokového žlabu. Přebytečný kal byl odčerpáván do kalového prostoru.

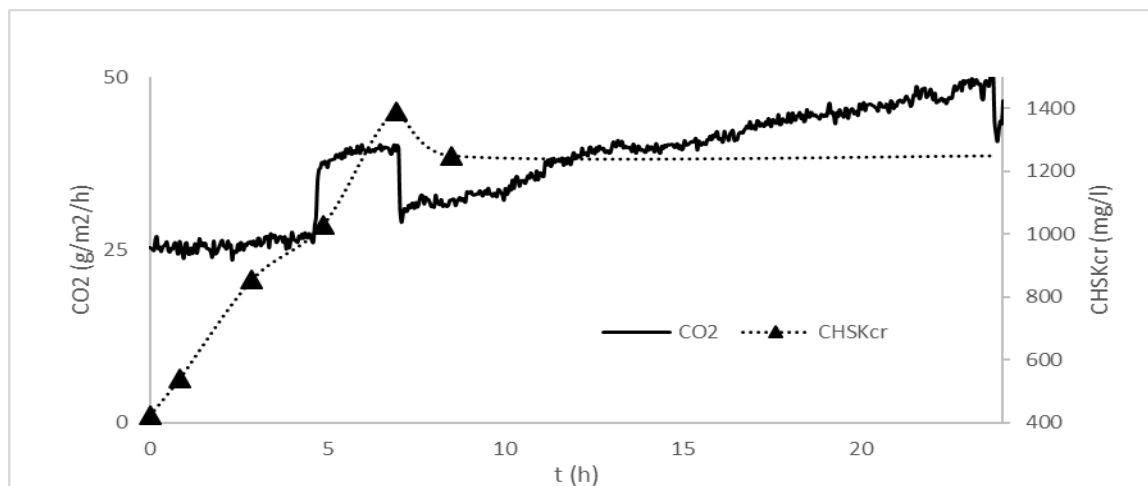
Pro kontinuální měření koncentrací CO_2 , N_2O a CH_4 v měřicí komoře byl použit fotoakustický plynový analyzátor INNOVA 1512, připojený k odběrovým sondám přes přepínač odběrových míst INNOVA 1409. Plyny byly jímány nad hladinou aktivační nádrže v plovoucí komoře s otevřeným dnem. Komora byla na plovácích umístěna na hladině aktivační nádrže. Půdorys komory byl 35 x 23 cm, objem cca 8,5 litru. Před měřením byla komora propláchnuta čistým vzduchem. V jednom rohu odběrové komory byl hadičkou do komory vháněn kompresorem venkovní vzduch, který z komory odcházel otvorem v protilehlém rohu komory. Pro podporu co nejlepšího proplachování celého objemu komory byl uvnitř komory umístěn malý axiální ventilátor. Průtok vzduchu komorou byl nastaven na 0,125 l/s. V blízkosti výstupního otvoru byla uvnitř komory umístěna odběrová sonda, ze které byla vzdušina přiváděna přes přepínač odběrových míst k plynovému analyzátoru. Druhá odběrová sonda byla umístěna na vstupu venkovního vzduchu do kompresoru a vzdušina byla přes další kanál přepínače přiváděna k analyzátoru. Stanovení koncentrací všech sledovaných plynů z jednoho vzorku vzdušiny trvalo přibližně 60 sekund. Z velikosti plochy hladiny uzavřené odběrovou komorou, z rozdílu koncentrací sledovaných plynů na vstupu a výstupu odběrové komory a z průtoku vzduchu komorou byly stanoveny hmotnosti vyprodukovaných plynů z hladiny odpadní vody vztažené na plochu 1 m² za 1 hodinu.

Do čistírny byla přiváděna odpadní voda ze zásobní nádrže o objemu 1 000 litrů. Před začátkem jednotlivých experimentů byla nádrž vždy naplněna reálnou komunální odpadní vodou. Do nádrže byly v průběhu experimentů dávkovány substráty pro zvýšení koncentrace organických látek (měřeno jako CHSK_{Cr}) a dusíku (N_c), nádrž byla promíchávána. Ostatní parametry provozu čistírny se během experimentu neměnily – průtok odpadní vody a intenzita provzdušňování byly konstantní, koncentrace kalu v aktivační nádrži byla udržována na průměrné hodnotě 3 g/l, koncentrace celkového fosforu průměrně 8 mg/l. Spolu s měřením plynů byly v aktivační nádrži měřeny teplota, pH a koncentrace rozpuštěného kyslíku, byly odebírány vzorky odpadní vody na přítoku do ČOV a na odtoku, aby bylo možné posoudit účinnost čištění. Před začátkem experimentu jsme měřili koncentrace plynů, abychom získali referenční hodnoty pro porovnání.

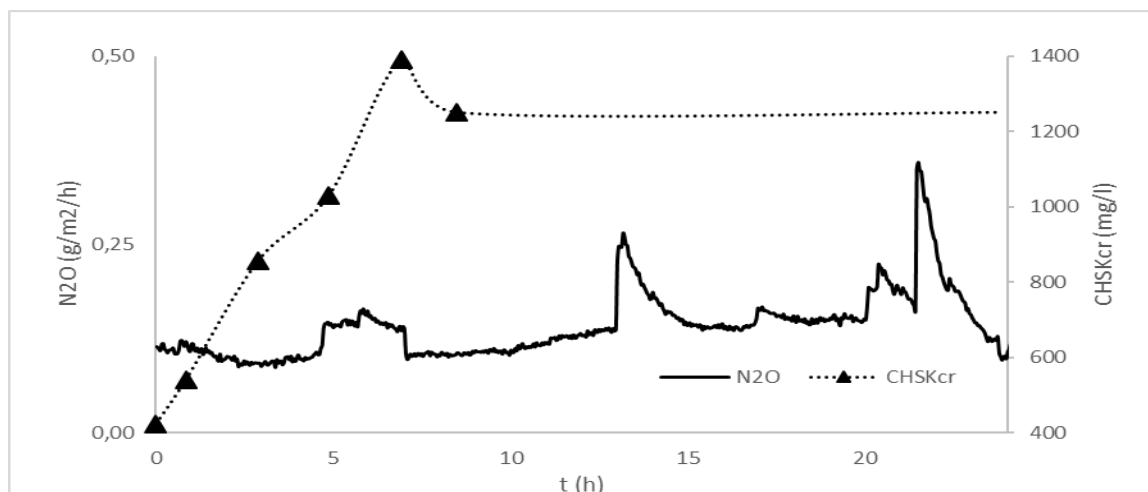
Výsledky a diskuse

Vliv zvýšeného organického zatížení

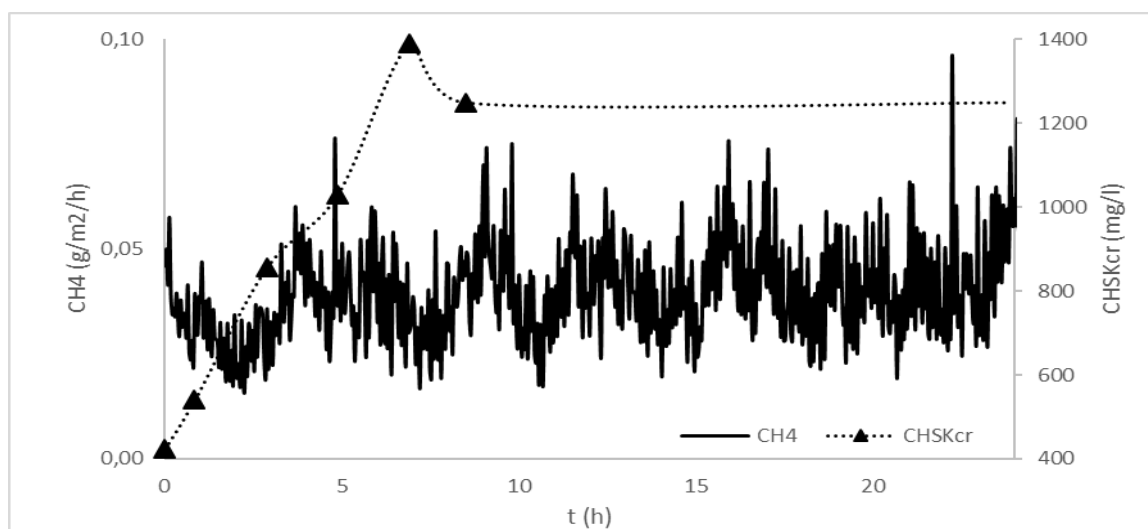
Během experimentu byla do zásobní nádrže s odpadní vodou postupně přidávána syrovátka jako zdroj organického substrátu. Koncentrace CHSK_{Cr} v odpadní vodě byla navýšena z počátečních 423 mg/l po přídavicích v intervalu cca 2 hodin na 1390 mg/l, po posledním přídávku a ustálení podmínek v nádrži byla hodnota CHSK_{Cr} 1250 mg/l. Látkové zatížení kalu CHSK bylo navýšeno z 0,08 na 0,25 kg/kg/d. Koncentrace dusíku v odpadní vodě nebyla v průběhu pokusu upravována (průměrně 68,8 mg/l N_c , resp. 42,4 mg/l N-NH_4^+). Teplota během pokusu byla průměrně 17,3 °C, koncentrace rozpuštěného kyslíku průměrně 3,1 mg/l. Průběhy produkce jednotlivých plynů v závislosti na koncentraci CHSK_{Cr} jsou na obrázcích 1 až 3. Změny produkce jednotlivých plynů v závislosti na koncentraci odpadní vody se vzhledem k objemům nádrží čistírny začaly projevovat cca 10 – 12 hodin po začátku pokusu.



Obrázek 1: Koncentrace $CHSK_{Cr}$ v přítoku odpadní vody a produkce CO_2



Obrázek 2: Koncentrace $CHSK_{Cr}$ v přítoku odpadní vody a produkce N_2O



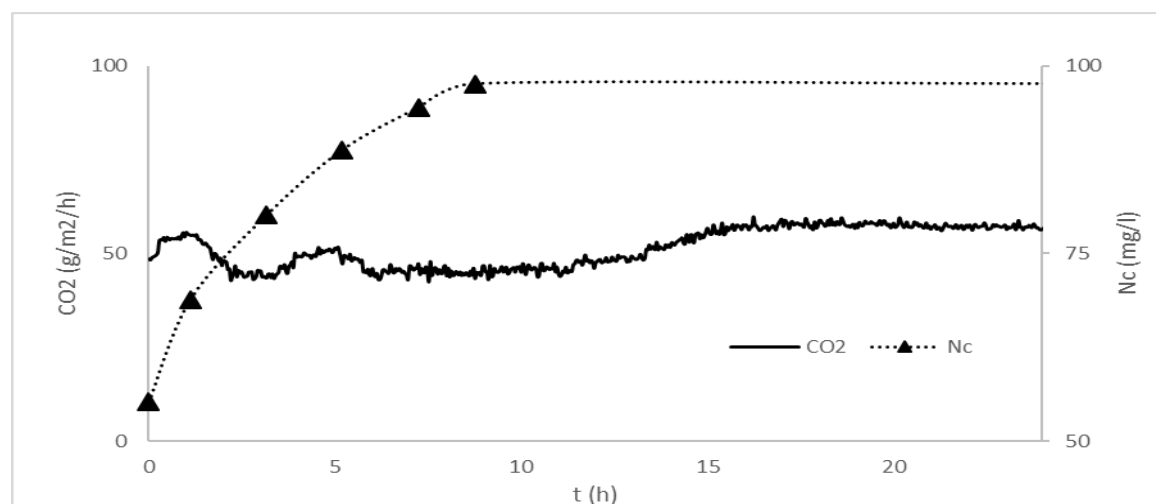
Obrázek 3: Koncentrace $CHSK_{Cr}$ v přítoku odpadní vody a produkce CH_4

Při zvyšování koncentrace CHSK_{Cr} v přítoku odpadní vody vzrostla produkce oxidu uhličitého (obrázek 1) téměř dvakrát, z průměrných $27,5 \text{ g/m}^2/\text{h}$ před začátkem pokusu na maximální hodnotu $50,1 \text{ g/m}^2/\text{h}$ na konci pokusu. Produkce oxidu dusného (obrázek 2) vykazovala mírně rostoucí trend s výraznými výkyvy, z průměrné počáteční hodnoty $0,125 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ na $0,128 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ na konci pokusu, ovšem až s trojnásobným maximem $0,358 \text{ g/m}^2/\text{h}$. Produkce metanu (obrázek 3) během pokusu kolísala okolo průměrné hodnoty $0,039 \text{ g/m}^2/\text{h}$.

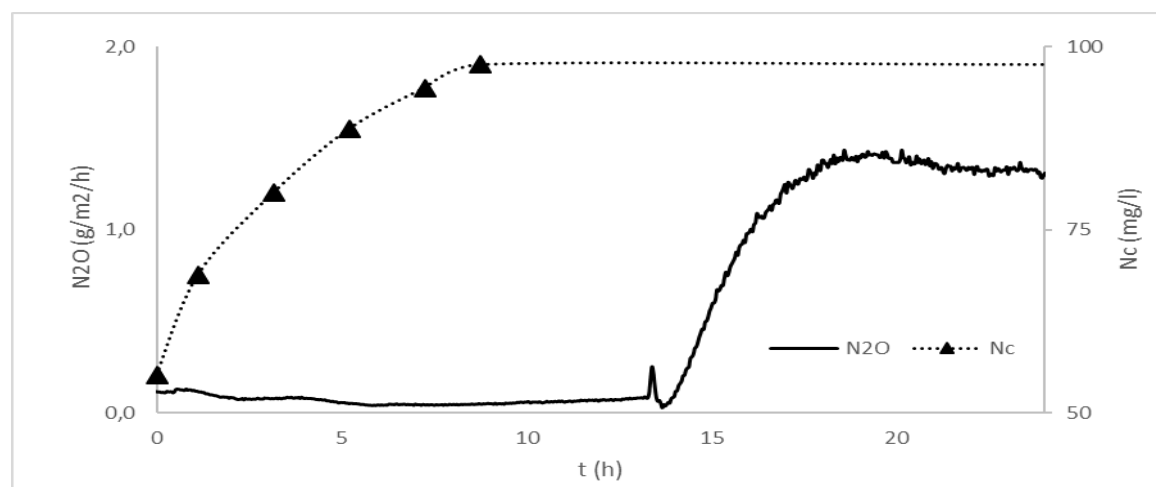
Účinnost čištění během zvyšování koncentrace CHSK_{Cr} se nezměnila – průměrně byla během pokusu 95% odstranění pro CHSK_{Cr} , resp. 99% odstranění N-NH_4^+ .

Vliv zvýšeného zatížení dusíkem

Během experimentu byla do zásobní nádrže s odpadní vodou cca po 2 hodinách postupně přidávána močovina jako zdroj dusíku. Koncentrace celkového dusíku v odpadní vodě byla navýšena z počátečních $55,2 \text{ mg/l}$ (resp. $32,9 \text{ mg/l N-NH}_4^+$) po přídavicích v intervalu cca 2 hodin na $97,6 \text{ mg/l}$ (resp. $69,5 \text{ mg/l N-NH}_4^+$). Látkové zatížení kalu dusíkem vzrostlo z $0,010$ na $0,018 \text{ kg/kd/d}$. Koncentrace CHSK_{Cr} v odpadní vodě nebyla v průběhu pokusu upravována (průměrně 714 mg/l). Teplota během pokusu byla průměrně $17,0^\circ\text{C}$, koncentrace rozpuštěného kyslíku průměrně $1,0 \text{ mg/l}$. Průběhy produkce jednotlivých plynů v závislosti na koncentraci N_c jsou na obrázcích 4 až 6. Změny produkce jednotlivých plynů v závislosti na koncentraci odpadní vody se vzhledem k objemům nádrží čistírny začaly projevovat cca 10 – 12 hodin po začátku pokusu.

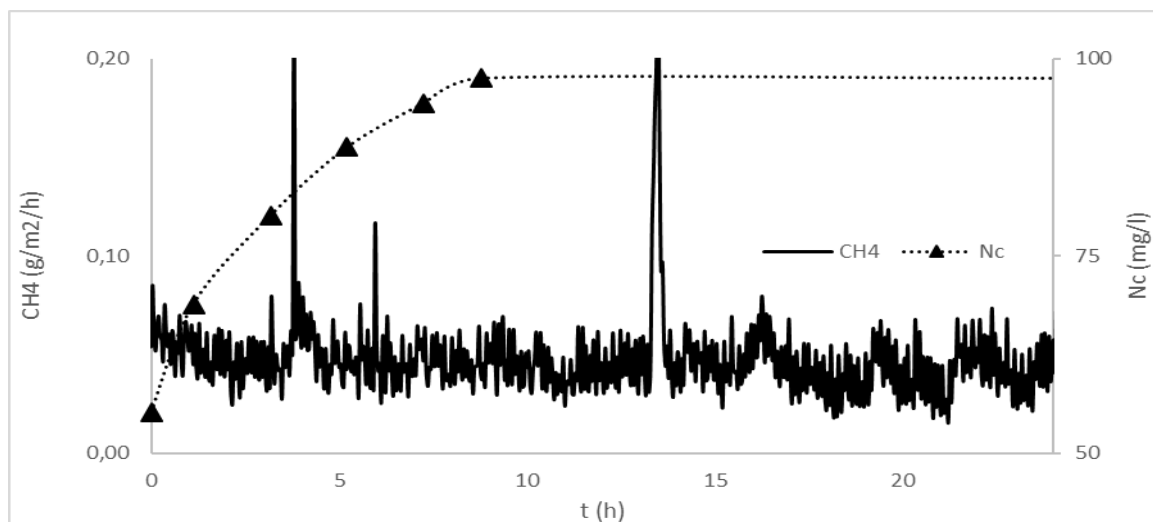


Obrázek 4: Koncentrace N_c v přítoku odpadní vody a produkce CO_2



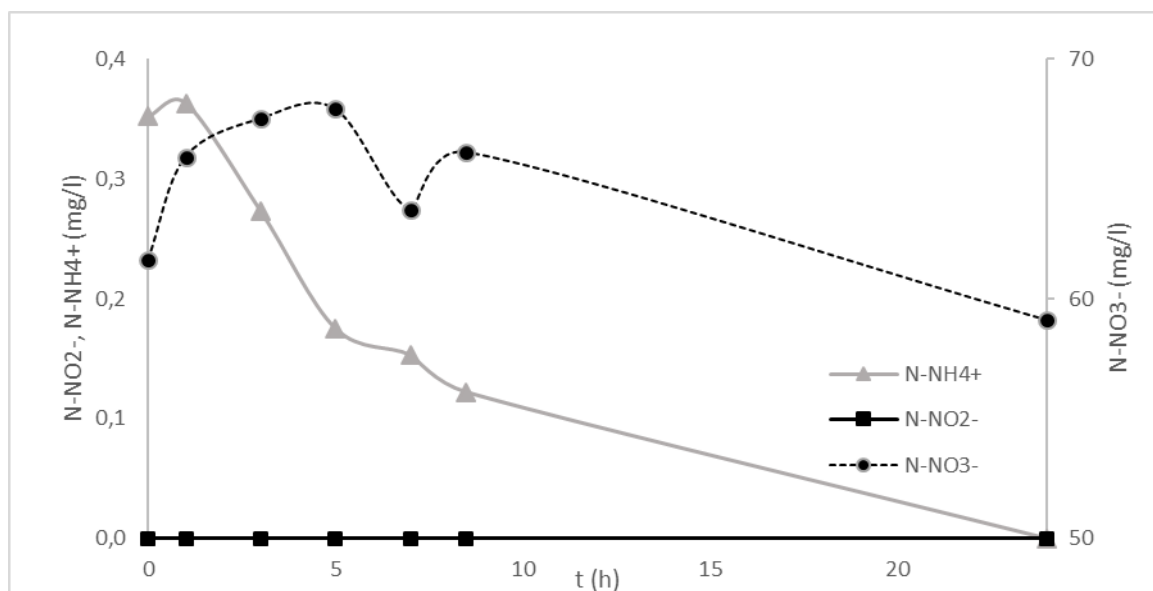
Obrázek 5: Koncentrace N_c v přítoku odpadní vody a produkce N_2O

Při zvyšování koncentrace dusíku v přítoku odpadní vody mírně vzrostla produkce CO_2 z průměrné počáteční hodnoty $49,2 \text{ g/m}^2/\text{h}$ na maximálně $56,0 \text{ g/m}^2/\text{h}$ (obrázek 4). Produkce N_2O (obrázek 5) po cca 12 hodinách od začátku pokusu prudce rostla – z původní průměrné hodnoty $0,060 \text{ g/m}^2/\text{h}$ až na $1,30 \text{ g/m}^2/\text{h}$ na konci pokusu, tedy až dvacetkrát oproti původním hodnotám. Produkce metanu (obrázek 6) se pohybovala okolo průměrné hodnoty $0,047 \text{ g/m}^2/\text{h}$ s maximálním píkem $0,253 \text{ g/m}^2/\text{h}$. Účinnost čištění během zvyšování koncentrace dusíku byla průměrně 93 % odstranění pro CHSK_{Cr} , resp. 99 % odstranění N-NH_4^+ .

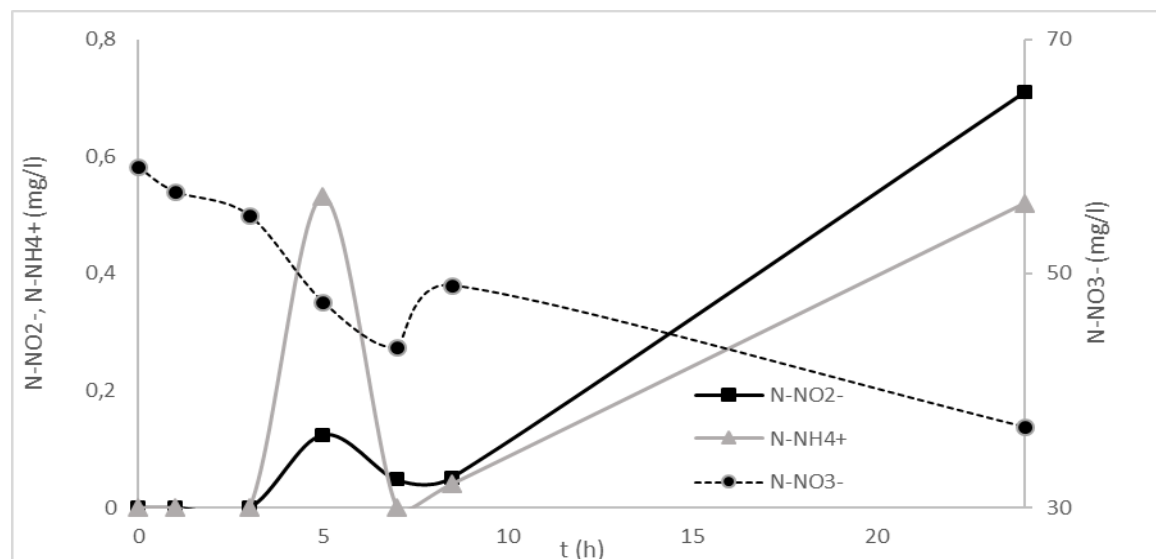


Obrázek 6: Koncentrace N_c v přítoku odpadní vody a produkce CH_4

V porovnání s experimentem zaměřeným na zvyšování organického zatížení (obrázek 7) došlo v odtékající odpadní vodě k posunu dusíkové bilance směrem k amoniakální a dusitanové formě v důsledku neúplné denitrifikace (obrázek 8).



Obrázek 7: Koncentrace forem dusíku v odtékající odpadní vodě při zvyšování zatížení CHSK



Obrázek 8: Koncentrace forem dusíku v odtékající odpadní vodě při zvyšování zatížení dusíkem

Z provedených měření je zřejmé, že produkce plynů rychle reaguje na složení odpadní vody. Se vzrůstajícím zatížením organickým substrátem rostla zejména respirace, tedy produkce oxidu uhličitého, který vzniká při rozkladu organických látek. Mírně vzrostla i produkce oxidu dusného. V režimu simultánní nitrifikace a denitrifikace a konstantní aerace, ve kterém byla čistírna při testech provozována, podporuje zvyšující se poměr CHSK:N denitrifikaci, a N₂O vznikající jako meziprodukt této reakce, je při aeraci stripován z nádrže.

Při vyšším zatížení dusíkem výrazně vzrostla produkce oxidu dusného, a to až dvacetkrát. Poměr CHSK:N v odpadní vodě se snižoval z původních 13,1:1 až na 7,3:1. Denitrifikace byla limitována nedostatkem snadno rozložitelného organického substrátu, oxidované formy dusíku nebyly plně redukovány a nahromaděný N₂O byl emitován z nádrže. Ve vyčištěné odpadní vodě odtékající z čistírny se během tohoto pokusu zvyšovala koncentrace dusitanového a amoniakálního dusíku a snižovala koncentrace dusičnanového dusíku. Tato zjištění jsou ve shodě s výsledky dalších studií^{16,22,23}.

Produkce metanu byla při obou prováděných testech přibližně stejná (průměrně 0,039 g/m²/h, resp. 0,047 g/m²/h) – nádrž byla během pokusů kontinuálně provzdušňována a tím byla metanogeneze do značné míry limitována.

Závěry

Produkce plynů při biologických procesech přímo souvisí s koncentrací čištěné odpadní vody. Při testování na domovní čistírně odpadních vod vedlo trojnásobné zvýšení koncentrace CHSK ke zvýšení produkce oxidu uhličitého až na dvojnásobek. Při zvyšování koncentrace dusíku (na dvojnásobek počáteční koncentrace) vzrostla produkce oxidu dusného až dvacetkrát. Výrazné navýšení produkce N₂O souvisí se změnou poměru CHSK:N z původních 13,1:1 na 7,3:1. Při nižším poměru byla denitrifikace limitována nedostatkem snadno rozložitelného organického substrátu, což vedlo k neúplné redukci oxidovaných forem dusíku a vyšším emisím nahromaděného N₂O. Produkce metanu se při vyšším zatížení výrazně neměnila, čistírna byla provozována v režimu simultánní nitrifikace a denitrifikace s kontinuálním provzdušňováním.

Emise oxidu dusného a metanu byly řádově nižší než emise oxidu uhličitého, jejich příspěvek ke skleníkovému efektu je ale násobně vyšší - při dostatečném množství organického substrátu byly naměřeny průměrné hodnoty 37,7 g/m²/h pro CO₂, 0,141 g/m²/h pro N₂O a 0,039 g/m²/h pro CH₄. Po přepočtu na ekvivalenty oxidu uhličitého s využitím aktuálních koeficientů GWP dosahovaly emise N₂O hodnoty 38,5 g CO₂e/h/m². V daném kontextu tak oxid dusný představuje 102 % přímých emisí

CO₂. Naproti tomu příspěvek metanu v provzdušňované nádrži (1,05 g CO₂e /h/m²) tvořil pouze přibližně 2,8 % celkové bilance sledovaných plynů.

Po zvýšení zatížení dusíkem a snížení poměru CHSK:N byly naměřeny průměrné hodnoty 51,6 g/m²/h pro CO₂, 0,536 g/m²/h pro N₂O a 0,047 g/m²/h pro CH₄, což při přepočtu na ekvivalenty oxidu uhličitého odpovídá 146,3 g CO₂e/m²/h pro oxid dusný a 1,27 g CO₂e/m²/h pro metan. V tomto případě oxid dusný činí 284 % přímých emisí CO₂ a naprosto převyšuje veškeré ostatní přímé emise plynů.

Výsledky potvrzují závislost emisí plynů na složení odpadní vody. Ačkoli v reálném provozu není možné vstupní parametry přímo kontrolovat, znalost mechanismů vzniku plynů a možnost predikce mají význam pro volbu a nastavení provozních opatření, která dokáží emise z aktivačních nádrží zmírnit.

Poděkování

Tento výstup vznikl v rámci projektu SS06010441 „Emise skleníkových plynů z čistíren odpadních vod a možnosti jejich snížení“, který je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

Literatura

1. Snip L.: *Quantifying the Greenhouse Gas Emissions of Wastewater Treatment Plants*. Wageningen University, Wageningen, NL, 2009.
2. IPCC: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
3. IPCC: *Climate Change 2021: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
4. Daelman M. R. J., van Voorthuizen E. M., van Dongen L. G. J. M., Volcke E. I. P., van Loosdrecht M. C. M.: *Water Sci. Technol.* 67 (10), 2350 (2013).
5. Gustavsson D. J. I., Tumlin S.: *Water Sci. Technol.* 68 (4), 887 (2013).
6. Lorenzo-Toja Y., Vázquez-Rowe I., Amores M. J., Termes-Rifé M., Marín-Navarro D., Moreira M. T., Feijoo G.: *Sci. Total Environ.* 566 – 567, 468 (2016).
7. Rodríguez-Caballero A., Aymerich I., Marques R., Poch M., Pijuan M.: *Water Res.* 71, 1 (2015).
8. Maktabifard M., Zaborowska E., Makinia J.: *Water Sci. Technol.* 79 (12), 2211 (2019).
9. Ministerstvo zemědělství ČR: *Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v roce 2024*. Ministerstvo zemědělství ČR, Praha, Česko, 2025.
10. Guisasola A., de Hass D., Keller J., Yuan Z.: *Water Res.* 42 (6-7), 1421 (2008).
11. Listowski A., Ngo H. H., Guo W. S., Vigneswaran S., Shin H. S., Moon H.: *J. Water Sustain.* 2, 113 (2011).
12. Gupta D., Singh S. K.: *J. Water Sustain.* 2 (2), 131 (2012).
13. Wrage N., Velthof G. L., van Beusichem M. L., Oenema O.: *Soil Biol. Biochem.* 33 (12–13), 1723 (2001).
14. Ahn J. H., Kim S., Park H., Rahm B., Pagilla K., Chandran K.: *Environ. Sci. Technol.* 45 (4), 1614 (2011).
15. Hu Z., Lotti T., de Kreuk M., Kleerebezem R., van Loosdrecht M. C. M.: *Water Res.* 47 (12), 4059 (2013).
16. Law Y., Lant P., Yuan Z.: *Water Res.* 45 (18), 5934 (2011).
17. Law Y., Ye L., Pan Y., Yuan Z.: *Philos. Trans. R. Soc., B* 367 (1593), 1265 (2012).

18. Campos J., Valenzuela-Heredia D., Pedrouso A., Val del Río Á., Belmonte M., Mosquera-Corral A.: J. Chem. 2016, 1 (2016).
19. Kampschreur M. J., Temmink H., Kleerebezem R., Jetten M. S. M., van Loosdrecht M. C. M.: Water Res. 43 (17), 4093 (2009).
20. Morales N., Val del Río A., Vazquez-Padín J. R., Mendez R., Mosquera-Corral A., Campos J. L.: Chemosphere 140, 99 (2015).
21. Alcantara C., Munoz R., Norvill Z., Plouviez M., Guieysse B.: Bioresour. Technol. 177, 110 (2015).
22. Kampschreur M. J., Poldermans R., Kleerebezem R., van der Star W. R., Haarhuis R., Abma W. R., Jetten M. S. M., van Loosdrecht M. C. M.: Water Sci. Technol. 60 (12), 3211 (2009).
23. Itokawa H., Hanaki K., Matsuo T.: Water Res. 35 (3), 657 (2001).

Effect of operating parameters on greenhouse gas production during wastewater treatment

Lenka SMETANOVÁ^a, Josef K. FUKSA^a, Martina PLECITÁ^a, Miroslav ČEŠPIVA^b, Petra ZABLOUDILOVÁ^b, Josef ZEMAN^b

^a TGM Water Research Institute, p.r.i., Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6, Czech Republic, e-mail: lenka.smetanova@vuv.cz

^b Czech Agrifood Research Center, p.r.i., Drnovská 507/73, 161 00 Praha 6, Czech Republic

Summary

Wastewater treatment plants (WWTPs) are primarily designed and operated to achieve the highest possible effluent quality, contributing to the reduction of pollution in receiving waters; however, they are also sources of gaseous emissions into the atmosphere. Currently (also in connection with the new Urban Wastewater Treatment Directive), attention is shifting towards ensuring that WWTPs are sustainable in terms of other environmental impacts as well. One such aspect is the production of greenhouse gases. Emissions associated with wastewater treatment arise from the generation of electricity consumed during wastewater management and other energy sources (indirect emissions), as well as from the treatment processes themselves – both naturally occurring and intensified (direct emissions). In this paper, we examine the influence of operating parameters on direct emissions of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane arising during municipal wastewater treatment, and we present the results of measurements of selected greenhouse gases above the water surface of an aeration tank in a small-scale (domestic) wastewater treatment plant.

Keywords: Wastewater treatment, Emissions, N₂O, Greenhouse gases, Organic load, Nitrogen load

Využití odpadního skla pro částečnou náhradu cementu v cementovém kompozitu podle ČSN EN 196-1

Aleš PALIČKA, Zdeněk PROŠEK

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29
Praha 6, Česká republika,
e-mail: ales.palicka@fsv.cvut.cz

Souhrn

Příspěvek se zabývá experimentálním hodnocením využitelnosti jemně mletého odpadního skla jako druhotné suroviny pro částečnou náhradu portlandského cementu v cementových kompozitech. Cílem studie bylo posoudit vliv různých dávek odpadní skleněné moučky (OSM) na mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, dynamický modul pružnosti) a vybrané mikrostrukturní charakteristiky. Byly připraveny zkušební směsi normových cementových past, v nichž byl cement nahrazen OSM v rozsahu 10 – 50 hm. %, a výsledky byly porovnány s referenční směsí bez náhrady. Zkoušky prokázaly pokles pevností i dynamického modulu pružnosti se zvyšující se dávkou OSM, přičemž nejvýraznější změny se projeví již při nižších úrovních náhrady. Mikroskopická analýza (SEM/EDS) doložila dobrou mechanickou integraci skleněných částic do cementové matrice. Výsledky poskytují experimentální podklady pro optimalizaci návrhu směsí s OSM (např. úpravou jemnosti či kombinací s dalšími reaktivními přísadami) a přispívají k rozvoji materiálového využití odpadního skla v rámci cirkulární ekonomiky ve stavebnictví.

Klíčová slova: odpadní materiály, odpadní sklo, recyklace, mechanické vlastnosti, cement.

Úvod

Udržitelné stavebnictví představuje jeden z klíčových nástrojů pro snižování environmentálních dopadů spojených s výrobou a užíváním stavebních materiálů ve stavebnictví. Podle dostupných údajů Českého statistického úřadu se celková produkce odpadů od roku 2014 do roku 2017 průměrně pohybovala okolo 40 milionů tun odpadu ročně. Mezi roky 2018 až 2022 se produkce snížila a stabilizovala na úroveň 39 milionů tun odpadu ročně v České republice. Z hlediska materiálového složení odpadů je vhodné analyzovat také vývoj produkce skleněného odpadu v České republice během poslední dekády. Skleněný odpad spadá do nekovových odpadů, které v roce 2022 představovaly 7 % z celkové hmotnostní produkce odpadů. Skleněný odpad činil 11,2 % z nekovových odpadů, což odpovídá přibližně 306 tisícům tun ročně. Objem produkce skleněného odpadu zůstává dlouhodobě stabilní, avšak stále představuje významnou materiálovou rezervu pro recyklaci^{1,2,3}.

Obalové sklo je obecně velmi dobře recyklovatelné, zpět do sklářského kmene, kde může být opakovaně využito při výrobě nových skleněných výrobků. Problém však představují zejména jemné, směsné, kontaminované nebo speciální frakce skla, které již nejsou pro recyklaci technologicky vhodné. Právě tyto obtížné recyklovatelné frakce je nutné materiálně využít jiným způsobem jako náhradu části cementu nebo kameniva v cementových kompozitech⁴.

Akumulace skleněného odpadu má závažné environmentální dopady, včetně znečištění půdy a zvýšené produkce prachových částic. Jednou z možností, jak tento problém řešit, je efektivní recyklace odpadního skla do cementového kompozitu. Alternativa přináší nejen environmentální přínosy ve formě snížení spotřeby přírodních zdrojů, ale i efektivní využití díky pucolánové aktivitě OSM^{5,6}.

Historicky byly prováděny pokusy o využití skla ve stavebních materiálech, které však narážely na problémy spojené s alkalickou křemičitou reakcí (ASR) a vznikem trhlin v betonu, což vede k narušení strukturální stability. V současnosti se však klade důraz na minimalizaci těchto rizik a na optimalizaci složení směsí. Moderní přístupy se zaměřují na snížení emisí, CO₂, efektivní recyklaci odpadu a

náhradu přírodních zdrojů ve stavebnictví. Výzkumy o zpracovatelnosti cementových směsí obsahujících odpadní sklo přinesly různé závěry. Některé studie upozorňují na snížení zpracovatelnosti s rostoucím obsahem skleněné příměsi^{7,8,9}, zatímco jiné naopak uvádějí zlepšení zpracovatelnosti v důsledku hladkému povrchu skleněných částic a nízké schopnosti vázat vodu¹⁰.

Studie vlivu odpadního skla na mechanické vlastnosti betonu často uvádějí snížení pevnosti v tlaku. Jev je připisován zejména ostrým hranám a hladkému povrchu skleněných částic, to vede k oslabení adheze mezi cementovou maticí a skleněnými částicemi v přechodové zóně (ITZ). Nízká absorpční schopnost skla a jeho omezená schopnost vázat vodu přispívají ke vzniku mikrotrhlin, které dále oslabují ITZ a dochází ke vzniku ASR, které dále rozvíjí mikrotrhliny. ASR vzniká v důsledku působení hydroxidových iontů OH^- silanolové Si-OH a siloxanové Si-O-Si , vazba tvořící amorfni křemičitou strukturu skla. Uvedeným procesem dochází k postupnému rozpouštění skleněných částí a vzniku expanzivního alkalického křemičitého gelu, který může narušovat mikrostrukturu cementového kompozitu. Výsledkem je snížení mechanické pevnosti, zvýšení propustnosti a v krajním případě objemová expanze, která může způsobit viditelné porušení konstrukce¹¹. Další výzkumy poukazují na omezení rizika ASR při použití dostatečně jemného skla. Při velikosti pod $75\text{ }\mu\text{m}$ se expanze ASR gelu významně redukuje a OSM vykazuje pucolánovou aktivitu s pozitivním vlivem na mikrostrukturu kompozitu¹².

Podobné trendy byly pozorovány u pevnosti v tahu za ohybu. Většina výzkumů uvádí pokles pevnosti s rostoucím podílem skla, avšak část zaznamenala mírné zvýšení pevnosti v tahu za ohybu (o 1 % až 5 %), což svědčí o možnosti optimalizace složení směsí. Rozdíly lze přičíst typu, velikosti, původu skleněného odpadu a formě zpracování.

Literatura uvádí, že jemné frakce skleněného odpadu $< 300\text{ }\mu\text{m}$ mohou při částečné náhradě přírodního písku vést pouze k mírnému snížení pevností, zejména při nízkých hmotnostních podílech náhrady do 20 hm. %. Naopak hrubší frakce v řádu milimetrů jsou považovány za rizikové, neboť mohou iniciovat ASR a způsobovat výraznější pokles mechanických vlastností¹³.

Článek se zaměřuje na vliv mikromletého odpadního skla na mechanické vlastnosti normových cementových past a na vyhodnocení jeho potenciálu jako alternativní příměsi pro částečnou náhradu cementu, s cílem přinést nové poznatky, které mohou přispět k efektivnímu využití odpadního skla.

Experimentální část

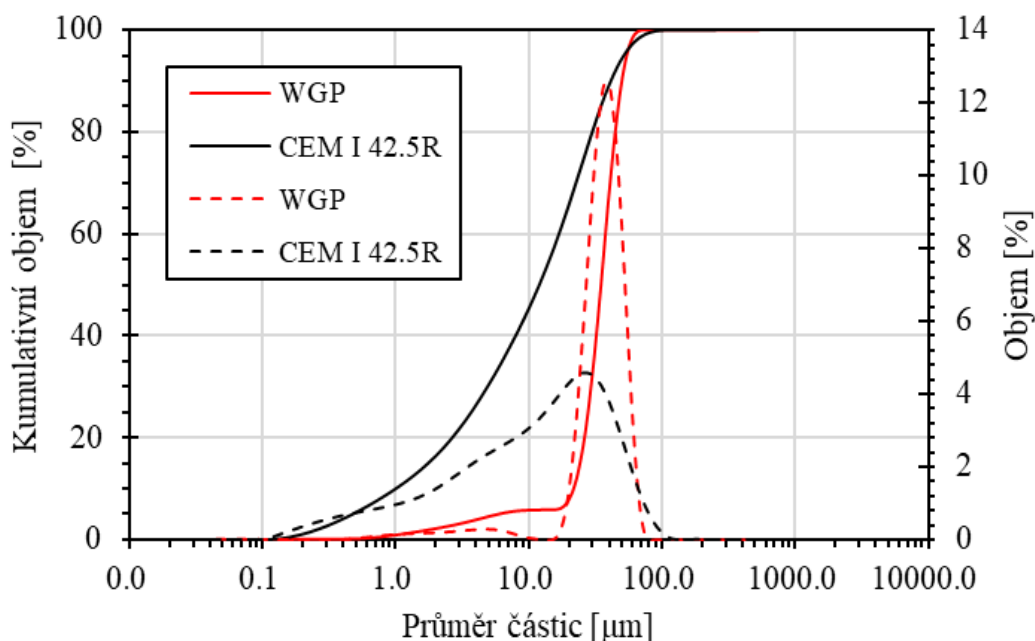
Vstupní materiály a vzorky

Zkušební vzorky byly vytvořeny z cementu, odpadního skla a normového písku. Pojivo tvořil portlandský cement CEM I 42,5 R vyráběný v závodě Radotín společnosti Heidelberg Materials CZ, splňující požadavky ČSN EN 197-1¹⁴. Jedná se o rychlovazný cement, který zajišťuje rychlý počátek hydratace a vývoj pevnosti v raném stádiu. Normový písek byl použit dle specifikace normy ČSN EN 196-1¹⁵ jako standardní křemičitý písek frakce 0,08 – 2,00 mm. Písek dodala společnost Strojírny Prostějov, s.r.o., certifikovaný dodavatel CEN standardního písku pro laboratorní zkoušky cementových malt. Normový písek zajišťuje opakovatelnost výsledků a slouží jako referenční plnivo při hodnocení různých pojivových systémů. Alternativní příměs pojiva byla připravena z odpadního obalového skla dodaného společností Recifa, a.s. (Česká republika), specializující se na recyklaci skleněného odpadu. Vstupní materiál tvořil převážně sodnovápenaté sklo, které bylo po mechanickém třídění a odstranění příměsí (kovy, keramika, porcelán, organické látky) jemně mleto v kulovém mlýně na odpadní skleněnou moučku (OSM).

Granulometrická analýza byla provedena na přístroji Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus (rozsah 0,08 – 1800 μm , ultrazvuková disperze, Fraunhoferův model difrakce). Granulometrická charakterizace OSM je zásadní pro posouzení vhodnosti jako alternativní složky v cementových kompozitech. Byla provedena detailní analýza distribuce velikostí částic OSM, které představují klíčový parametr ovlivňující mechanické, chemické a zpracovatelské vlastnosti cementových směsí. Střední průměr částic, měřený metodou Fraunhoferovy difrakce, dosahoval hodnoty 35,9 μm . Uvedená jemnost mletí (obrázek 1) zajišťuje dosažení pucolánové aktivity, klíčové pro zlepšení dlouhodobých mechanických vlastností směsí^{16,17,18}. Výsledky granulometrické analýzy potvrzují, že OSM s danou distribucí částic je vhodné

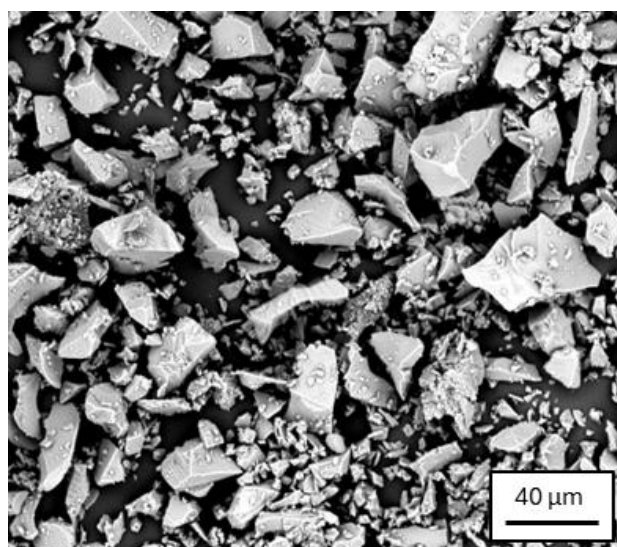
pro použití jako částečná náhrada cementu v cementových směsích. Jemná granulometrie a vysoký obsah oxidu křemičitého (SiO_2) zajišťují nejen chemickou reaktivitu, ale také dostatečnou zpracovatelnost směsi. Vlastnosti předurčují odpadní sklo namletou na OSM jako slibnou surovinu pro ekologicky udržitelná řešení ve stavebním průmyslu^{19,20}.

Pro ověření jemnosti byl dále stanoven měrný povrch Blaineovou metodou podle ČSN EN 196-6. Naměřené hodnoty činily CEM I 42,5 R: 365 m^2/kg a OSM: 290 m^2/kg . OSM tedy vykazuje přibližně o 20 % nižší měrný povrch než cement.



Obrázek 1: Granulometrická charakterizace odpadní skleněné moučky (OSM).

Morfologie a tvar částic byly hodnoceny pomocí SEM Phenom XL (ThermoFisher Scientific) se zpětně odraženými elektrony (BSE). Na obrázku 2 lze vidět jednotlivá zrna OSM. Částice mají nepravidelný a ostrohranný tvar s výraznými lomovými plochami, což je typické pro mechanicky mletý skleněný odpad. Tvarová charakteristika naznačuje vysoký specifický povrch, který může být výhodný z hlediska reaktivity s okolním prostředím.



Obrázek 2: SEM snímek OSM, detektor zpětně odražených elektronů, zvětšeno 1 000×.

Chemické složení cementu, OSM a normového písku bylo stanoveno pomocí rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF) na přístroji Spectro Xepos (50 W/60 kV). Výsledky analýzy jsou uvedeny v Tabulce 1. Z výsledků rentgenové fluorescenční analýzy (tabulka 1) vyplývá, že portlandský cement CEM I 42,5 R vykazuje vysoký obsah oxidu vápenatého ($\text{CaO} \approx 65 \%$) a odpovídající podíl oxidu křemičitého ($\text{SiO}_2 = 20 \%$), což potvrzuje převahu alitové fáze (C3S) odpovědné za rychlý nárůst pevnosti. Naproti tomu OSM je tvořena převážně oxidem křemičitým ($\text{SiO}_2 > 80 \%$) a vyšším obsahem alkalických oxidů, zejména $\text{Na}_2\text{O} = 14 \%$. Chemické složení odpovídá běžnému sodnovápenatému obalovému sklu, jehož vysoký obsah SiO_2 podporuje pucolánovou aktivitu, zatímco zvýšený obsah alkalických složek může zvyšovat riziko ASR při vyšších podílech náhrady.

Tabulka 1: Chemické složení vstupních materiálů (XRF, hm. %).

Složka	CEM I 42,5 R	OSM	Normový písek
CaO	64,8	2,6	–
SiO_2	20,1	81,2	99,1
Fe_2O_3	2,5	–	0,1
Na_2O	–	14,4	–
Al_2O_3	4,0	–	0,2
SO_3	3,0	–	–
Ostatní	2,3	0,1	0,1
Ztráta žíháním (LOI)	3,0	2,0	0,5

Složení jednotlivých testovaných směsí je uvedeno v tabulce 2. Vodní součinitel vyjadřuje poměr vody k celkové hmotnosti pojiva tedy cementu a OSM, který pojivo nahrazuje. Vodní součinitel byl navržen tak, aby byla hodnota konstantní 0,45. Během výroby byla kontrolována zpracovatelnost čerstvé směsi pomocí zkoušky rozlité kužele podle ČSN EN 1015-3. Čerstvá směs byla naplněna do ocelové formy ve tvaru komolého kužele umístěné na hladkém povrchu desky stolu a zhutněna předepsaným způsobem. Následně byla forma plynule nadzvednuta ve vertikálním směru a zkušební stolek podroben 20 rázům. Po ustálení směsi byl změřen průměr rozlivu ve dvou navzájem kolmých směrech a z jejich aritmetického průměru byla stanovena výsledná hodnota konzistence. U všech testovaných směsí byly hodnoty rozlivu v rozmezí 167 – 181 mm, jak je uvedeno v tabulce 2.

Vzorky cementové pasty byly v laboratorním prostředí po jednom dni odformovány a následně uloženy do vodní lázně při teplotě $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Zkoušení mechanických vlastností probíhalo na 6 vzorcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm při stáří 7, 28 a 365 dnů.

Tabulka 2: Složení testovaných směsí obsahující odpadní skleněnou moučku.

Označení	Cement CEM I 42,5R [g]	Normativní křemičitý písek [g]	OSM [g]	Vodní součinitel [-]	Zpracovatelnost [mm]
Ref	900	2700	0	0,45	171±5
S10	810	2700	90	0,45	168±5
S20	720	2700	180	0,45	175±10
S30	630	2700	270	0,45	181±1
S40	540	2700	360	0,45	170±1
S50	450	2700	450	0,45	167±5

Experimentální metody

Destruktivní mechanické zkoušky ztvrdlých vzorků byly prováděny na zkušebním lisu FP100 Heckert. Pevnost v tahu za ohybu byla vyhodnocena pomocí tříbodového ohybového testu, kde vzdálenost mezi podpěrami činila 100 mm a rychlost zatěžování byla stanovena konstantním posunem 0,1 mm/s. Pevnost v tlaku byla měřena na polovinách zlomených těles vzniklých po ohybové zkoušce se zatěžovací plochou 40 × 40 mm. Rychlost zatěžování při tlakové zkoušce odpovídala posunu 0,3 mm/s.

Pro doplnění destruktivního hodnocení byla na vybraných vzorcích aplikována také nedestruktivní rezonanční metoda pomocí analyzátoru Brüel & Kjær 3560-B-120, která umožňuje stanovení dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu na základě měření vlastních frekvencí kmitání. Metoda poskytla doplňující informace o vnitřní homogenitě materiálu bez porušení zkušebního tělesa a byla využita k ověření a podpoře výsledků získaných destruktivními testy.

Pro zhodnocení mikrostruktury byly po ukončení mechanických zkoušek zbytkové fragmenty vzorků zalaty do epoxidové pryskyřice a připraveny ve formě leštěných vzorků, které byly následně pozorovány pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Před analýzou byly vzorky vysušeny a pokoveny tenkou vrstvou zlata za účelem zajištění elektrické vodivosti povrchu. Pozorování bylo provedeno pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu ZEISS Merlin při urychlovacím napětí 15 kV a zvětšení 1000×. Pro analýzu byly vybrány oblasti s rovnoměrně rozloženou maticí a dobře patrnými fázemi. Cílem bylo identifikovat morfologii vstupních surovin, interakci jednotlivých složek v cementové matici a případné známky pucolánových reakcí. Zvláštní pozornost byla věnována části mikromleté OSM a jejich zapojení do hydratační struktury kompozitu^{20,21}.

Výsledky a diskuse

Mechanické vlastnosti

Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku cementových past s různým podílem OSM jsou zobrazeny na Obrázku 3 a 4. Pevnost v tahu za ohybu cementových past s 10% a 20% hmotnostním podílem OSM (S10 a S20) vykazují mírný pokles pevností v tlaku oproti referenčnímu vzorku (REF). S rostoucím podílem OSM v cementových pastách (S30, S40, S50) dochází k výraznějšímu poklesu pevnosti. Nejnižší pevnosti bylo dosaženo u směsi s 50% hmotnostním podílem OSM (S50), kde pevnost v tahu za ohybu klesla o 33 % ve srovnání s referenčním vzorkem po 365 dnech. Pokles je důsledkem narušení mikrostruktury, omezené hydratace, a především nedostatečné reaktivity OSM. OSM díky přítomnosti amorfního oxidu křemičitého SiO₂ vykazuje potenciální pucolánovou aktivitu, literatura uvádí, že tato aktivita probíhá pouze při velmi jemné frakci (< 75 µm) a dostatečném množství Ca(OH)₂ uvolněném během hydratace cementu^{21,22}.

Pevnost v tlaku cementových past vykazuje obdobný trend jako pevnost v tahu za ohybu. Referenční vzorek (REF) dosahuje nejvyšších hodnot, zatímco pevnost v tlaku u vzorků s vyšším podílem OSM výrazně klesá. U vzorku S50 došlo ke snížení pevnosti v tlaku o 58 % oproti referenčnímu vzorku po 365 dnech. Nárůst podílu OSM ve směsích vedl k postupnému a plynulému poklesu mechanických vlastností. Pokles nesouvisí s úplnou inertností OSM, ale s jeho omezenou reaktivitou. K poklesu pevností přispívá také narušení mikrostruktury, tvorba mikrotrhlin a omezená vazba mezi cementovou maticí a částicemi plniva, což vede ke zhoršenému přenosu napětí. Celkově výsledky ukazují, že i nižší úroveň náhrady cementu vedou k výraznému snížení pevností a s rostoucím podílem OSM se tento negativní trend dále prohlubuje, což omezuje možnost využití vyšších úrovní tohoto materiálu v cementových kompozitech.

Porovnáním dynamických modulů jednotlivých směsí (obrázek 5 a 6) lze vidět, že směsi s nižším obsahem OSM (10 hm. % a 20 hm. %) vykazují stabilní a rovnoměrný růst dynamického modulu pružnosti i pevností v čase. Jejich vývoj je podobný referenční směsi, což naznačuje, že při nízkém stupni náhrady nedochází k výraznému narušení mikrostruktury ani přenosových mechanismů v cementové matici. Směs s 30 hm. % OSM vykazuje pomalejší růst modulu než u S10 a S20, avšak výraznější než u S40 a S50. Stabilizace hodnot nastává později (po 178 dnech), což souvisí s kombinací omezené reaktivity OSM a postupným vývojem mikrostruktury. U směsí s vyšším podílem OSM

(40 hm. % a 50 hm. %) je růst dynamického modulu pružnosti pozvolnější, avšak nikoli stabilizovaný či klesající, i v pozdějších stádiích hydratace je patrný mírný nárůst hodnot, což odpovídá vývoji na obrázcích 5 a 6. Odpovídá charakter postupné tvorby hydratačních produktů při omezené reaktivitě OSM a současně pokles porozity, která zvyšuje výslednou tuhost materiálu. Porozita nebyla v rámci této studie stanovena rtuťovou porozimetrií, avšak pozorované trendy odpovídají literárním poznatkům o vztahu porozity a modulu pružnosti cementových kompozitů²².

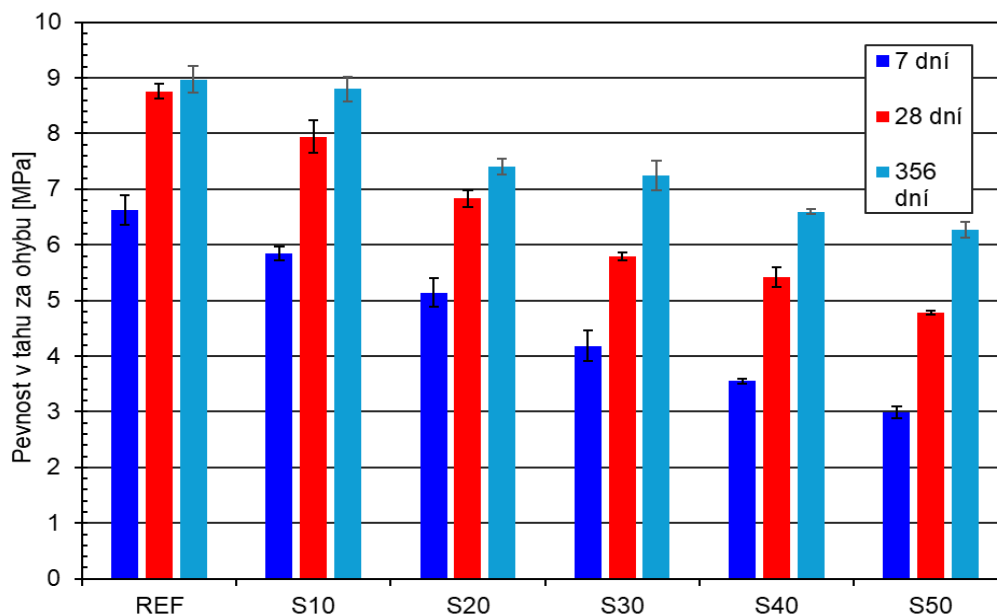
Výsledky prokázaly, že již nízké podíly náhrady cementu odpadní skleněnou moučkou 10 – 20 hm. % vedou k poklesu pevnosti, který je větší, než odpovídá samotnému snížení množství cementu. Přestože lze na základě mikrostruktury předpokládat určitou míru pucolánové aktivity OSM, její přínos není v mechanických vlastnostech dominantní. Výsledky ukazují, že použití OSM jako náhrady cementu je z hlediska pevnostních parametrů limitován a vyžaduje další optimalizaci, zejména v oblasti jemnosti mletí a posouzení skutečné reaktivity materiálu. Při vyšších úrovních náhrady se negativní vlivy dále prohlubují v důsledku nižší reaktivity skla a výrazného oslabení mikrostruktury kompozitu.

Pro komplexnější posouzení účinnosti OSM byla dále vyhodnocena nepřímá pevnostní aktivita pomocí indexu SAI (Strength Activity Index). SAI je definován jako poměr pevnosti v tlaku s OSM k pevnosti referenční pasty a představuje běžně používaný ukazatel výkonnosti druhotných surovin. Hodnoty SAI jsou uvedeny v tabulce č. 3.

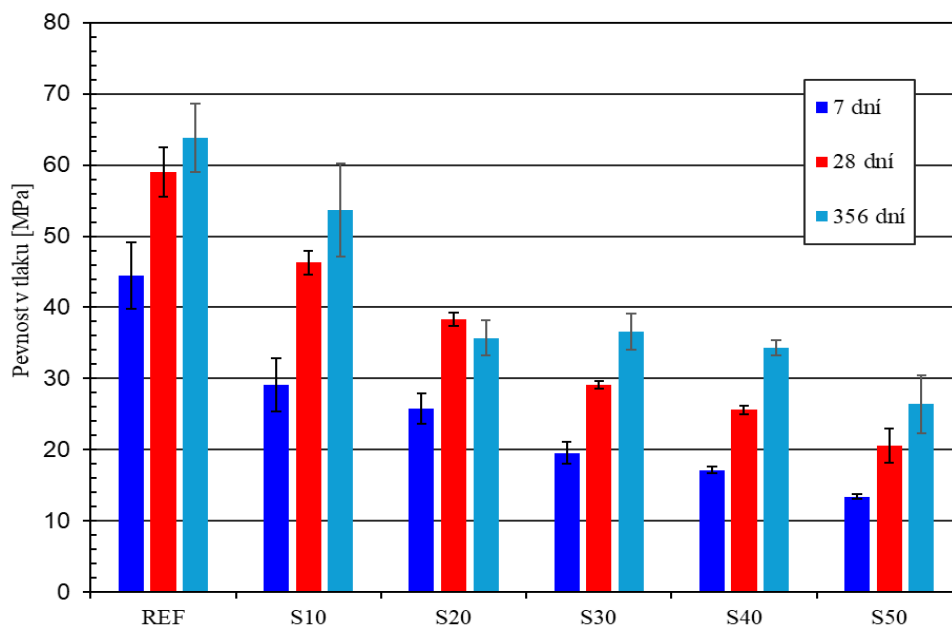
Tabulka 3: Strength Activity Index (SAI) směsí s OSM vzhledem k referenci.

Označení	SAI 7 dní [%]	SAI 28 dní [%]	SAI 356 dní [%]
REF	100	100	100
S10	65,5	78,4	84,2
S20	57,9	65,0	56,0
S30	43,9	49,3	57,4
S40	38,5	43,4	53,8
S50	30,2	34,9	41,4

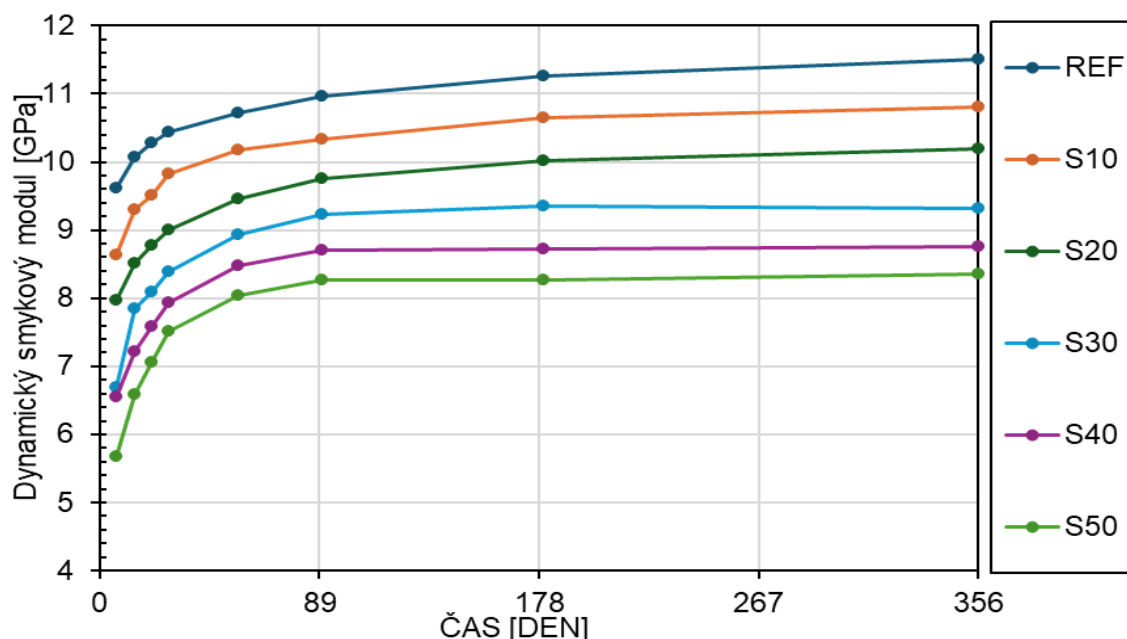
Z výsledků SAI je patrné, že všechny směsi s OSM vykazují nižší pevnost v tlaku než referenční směs. Již při 10 – 20 hm. % náhrady cementu dosahují hodnoty SAI po 28 dnech maximálně 65 – 78 %, přičemž při vyšších úrovních náhrady (30 – 50 hm. %) SAI klesá pod 60 %. Výsledky potvrzují, že OSM vykazuje pouze omezenou pucolánovou aktivitu a její pozitivní vliv na průběh hydratačních procesů není schopen kompenzovat pevnostní ztráty způsobené sníženým obsahem cementu a oslabením přechodové zóny.



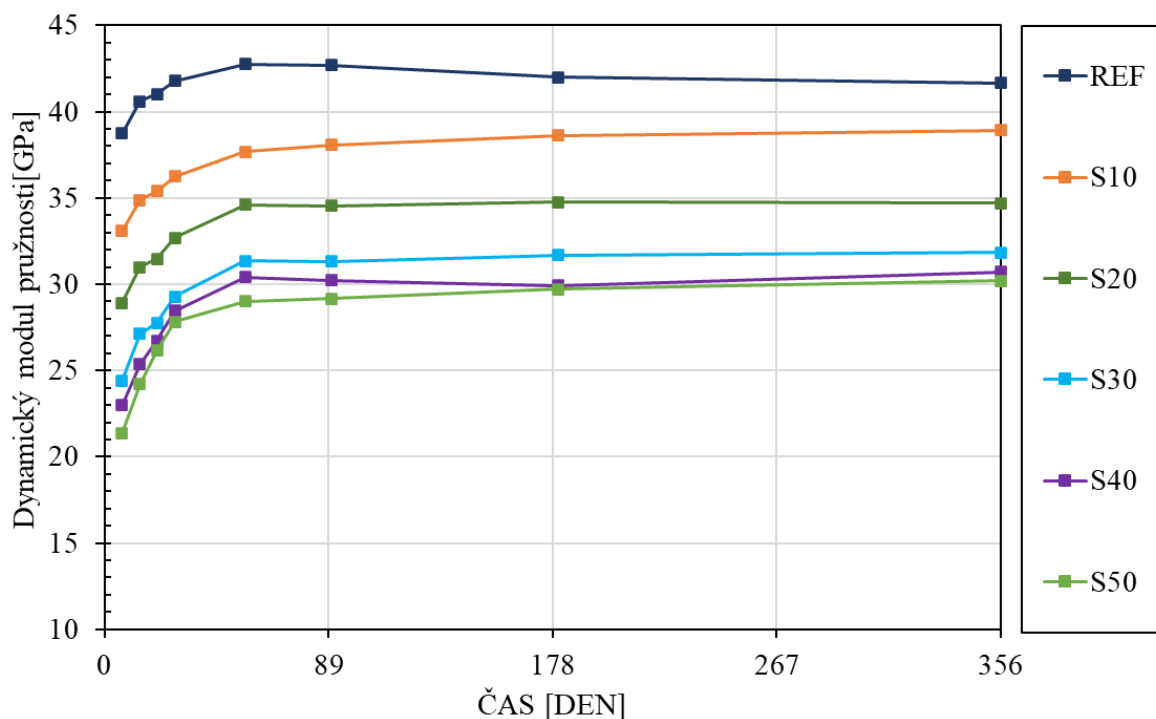
Obrázek 3: Pevnost v tahu za ohybu cementových past s různým hmotnostním podílem OSM v závislosti na čase, s uvedenou směrodatnou odchylkou.



Obrázek 4: Pevnost v tlaku cementových past s různým hmotnostním podílem OSM v závislosti na čase, s uvedenou směrodatnou odchylkou.



Obrázek 5: Dynamický smykový modul, max. směrodatná odchylka průměrných hodnot 5 %.

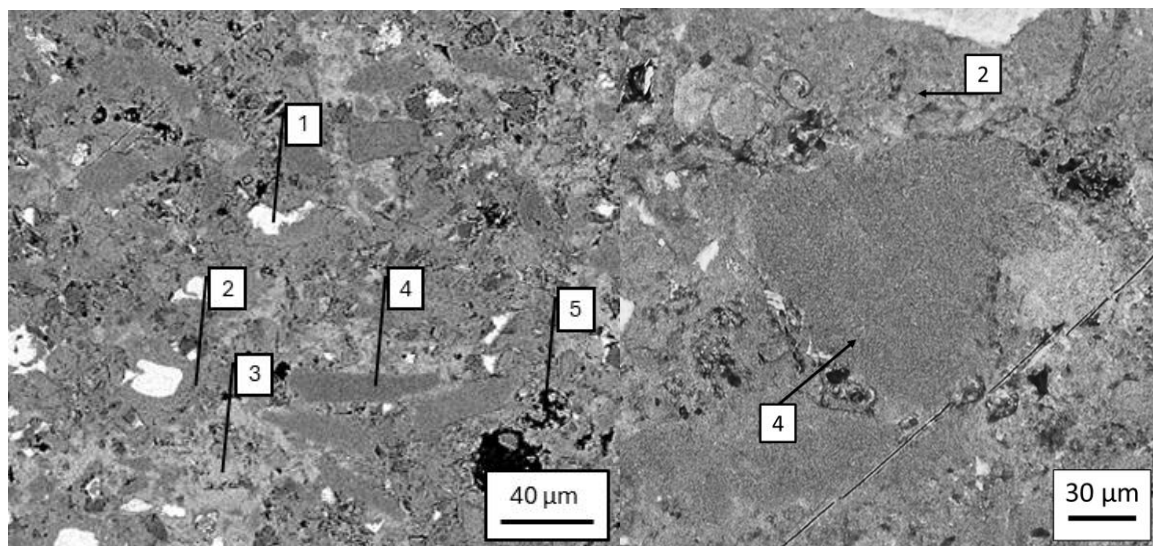


Obrázek 6: Dynamický modul pružnosti, max. směrodatná odchylka průměrných hodnot 5 %.

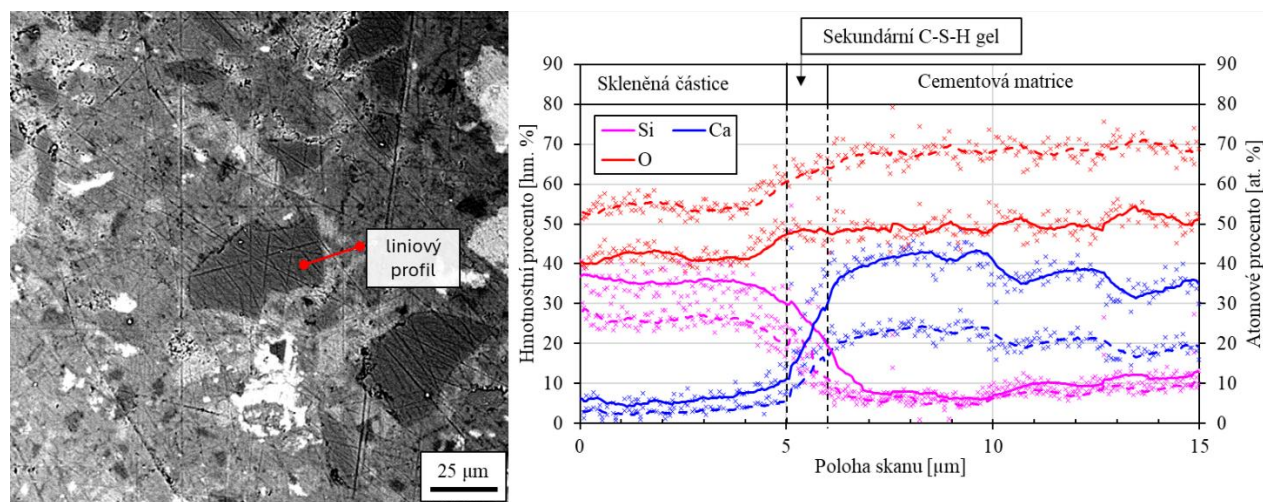
Mikroskopická analýza

Na obrázku 7 je patrné, že skleněné částice (OSM) jsou v cementové matici rovnoměrně rozptýlené a na řadě míst si zachovávají původní kontury. Zároveň je na některých zrnech patrné lokální narušení povrchu, což může naznačovat jejich částečnou reaktivitu v alkalickém prostředí cementového tmelu. Ze samotných SEM snímků však nelze jednoznačně kvantifikovat rozsah pucolánových reakcí ani spolehlivě odlišit případný sekundární C-S-H gel od primárních hydratačních produktů. Ze snímků je možné především konstatovat, že zrna OSM jsou v kontaktu s hydratačními produkty a jsou v jejich okolí přítomny jak oblasti C-S-H gelu, tak portlandit, včetně zóny přiléhající k částicím OSM. Pozorované

dobré zakomponování částic bez zjevných separačních vrstev či výrazně pórovitých mezivrstev nicméně svědčí o dobré mechanické integraci OSM v matici. Na obrázku 8 je uveden EDS liniový sken vedený přes zrno OSM a přilehlou cementovou matici. Profil dokumentuje výraznou změnu elementárního složení na rozhraní částice a matrice. V úseku přibližně od 5 do 6 μm je patrné zvýšené zastoupení křemíku (a odpovídající změna zastoupení ostatních prvků), což naznačuje možnou tvorbu sekundárního C-S-H gelu.



Obrázek 7: SEM snímek mikrostruktury cementové pasty s 20 % náhradou cementu sklem po 3 měsících, detektor zpětně odražených elektronů, zvětšeno 1 000 $\times$: Označené fáze: 1 – nezhydratovaný slínek, 2 – C-S-H gel, 3 – portlandit, 4 – sklo, 5 – pór (vlevo), SEM snímek cementové matrice s částečně zakomponovanou částicí odpadní skleněné moučky, zvětšení 2000 $\times$ (vpravo).



Obrázek 8: SEM snímek rozhraní mezi částicí odpadní skleněné moučky (OSM) a cementovou maticí s odpovídajícím EDS liniovým profilem prvků. Plné křivky znázorňují hmotnostní procenta (hm. %), čárkované křivky atomová procenta (at. %) prvků.

Poznatky z mikroskopické analýzy jsou v souladu s publikovanými závěry o potenciální pucolánové aktivitě jemně mletého skla. Shi et al.¹⁹ uvádí, že jemně mleté sklo může přispívat k tvorbě dodatečných hydratačních produktů typu C-S-H a ovlivňovat průběh hydratace. Matos a Sousa-Coutinho²⁰ popsali postupné rozpouštění skleněných částic v cementové matici a jeho souvislost s vyplňováním pórového

prostoru a zahušťováním hydratačních produktů, což se může příznivě projevit na mechanických vlastnostech. Shao et al.²⁴ zdůrazňují zásadní vliv jemnosti mletí na rychlost a rozsah případných pucolánových reakcí. Z uvedeného vyplývá, že OSM se v cementové matici nemusí chovat inertně a může se podílet na vývoji mikrostruktury^{24,25}.

Závěry

Výsledky této studie ukazují, že náhrada cementu odpadní skleněnou moučkou (OSM) v použité podobě a v rozsahu 10 – 50 hm. % vede k poklesu mechanických vlastností cementových past. Nejvýraznější snížení pevnosti v tlaku bylo pozorováno již při nižších náhradách 10 – 20 hm. %, zatímco při dalším zvyšování podílu OSM je trend poklesu pevnosti v tlaku méně strmý. Uvedený trend potvrzují jak hodnoty pevností v tlaku a v tahu za ohybu, tak i pevnostní index SAI. Na základě dostupných výsledků lze konstatovat, že samotná prostá substituce cementu OSM neposkytuje výsledné mechanické vlastnosti kompozitu srovnatelné s referenční směsí.

Současně však získaná data potvrzují, že OSM může představovat perspektivní surovinový zdroj pro cementové kompozity, zejména pokud bude její využití spojeno s cílenou optimalizací (např. úpravou jemnosti mletí, fyzikálně-chemickou aktivací). V praxi se tak otevírá prostor pro aplikace, kde je požadavek na udržitelnost a materiálové využití odpadu vyvažován specifickými nároky na mechanické vlastnosti (např. směsi s nižšími pevnostními požadavky). Získané výsledky tak poskytují důležitý experimentální základ pro navazující výzkum zaměřený na zvýšení efektivitu využití OSM a na návrh směsí, které dokážou lépe kompenzovat pokles mechanických vlastností.

Poděkování

Článek byl finančně podpořen výzkumným projektem GA ČR pod číslem GA23-05500S s názvem "Vliv povrchových úprav druhotných surovin na bázi křemíku na jejich působení v cementových kompozitech" a Českým vysokým učením technickým v Praze v rámci projektu SGS č. SGS25/035/OHK1/1T/11.

Literatura

1. Česká spořitelna: *Recyklace skla v ČR: Co prozrazují aktuální data*. Česká spořitelna [online]. [cit. 27.11.2024]. Dostupné z: <https://www.csas.cz/cs/firmy/articles/24/recyklace-skla-v-cr-co-prozrazuji-aktualni-data>
2. Český statistický úřad: *Aktuální výsledky odpadové statistiky*. Statistika&My [online]. [cit. 27.11.2024]. Dostupné z: <https://statistikaamy.csu.gov.cz/aktualni-vysledky-odpadove-statistiky>
3. Český statistický úřad: *Zaměřeno na odpady*. Statistika&My, 27.03.2023 [online]. [cit. 01.11.2024]. Dostupné z: <https://statistikaamy.csu.gov.cz/zamereno-na-odpady>.
4. Dong, W., Li, W. a Tao, Z.: *Resources, Conservation and Recycling* 172, 105664 (2021).
5. Siddika A. et al.: *Polymers* 13(13) (2021).
6. Ramírez-Arellanes S. et al.: *Recycling*, 5(3), (2025).
7. Taha B., Nounu G.: *Constr. Build. Mater.* 22, 713 (2008).
8. Taha B., Nounu G.: *J. Mater. Civ. Eng.* 21, 709 (2009).
9. Ali E.E., Al-Tersawy S.H.: *Constr. Build. Mater.* 35, 785 (2012).
10. Al-Tayeb M.M., Abu Aisheh Y.I., Qaidi S.M.A., Tayeh B.A.: *Case Stud. Constr. Mater.* 17, 01324 (2022).
11. Jiao Y., Zhang Y., Guo M., Zhang L., Ning H., Liu S.: *J. Clean. Prod.* 277, 123501 (2020).
12. Bueno E.T. et al.: *Journal of Cleaner Production* 257, 120180 (2020).
13. Arabi N., Meftah H., Amara H., Kebaïli O., Berredjem L.: *Constr. Build. Mater.* 209, 364 (2019).

14. ČSN EN 197-1: *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
15. ČSN EN 196-1: *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
16. Heidelberg Materials CZ: CEM I 42,5 R. Heidelberg Materials CZ [online]. [cit. 28.11.2024]. Dostupné z: <https://www.heidelbergmaterials.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>.
17. AMT Příbram: *Zpracování odpadů*. Recifa, a.s. [online]. [cit. 20.11.2024]. Dostupné z: <https://www.recifa.cz/amtpribram/>
18. Čimburek S.: *Recyklace skla v ČR*. Česká asociace odpadového hospodářství, 19.11.2018 [online]. [cit. 20.11.2024]. Dostupné z: <https://www.caoh.cz/aktuality/zeptali-jsme-se-stanislav-cimburek-recyklace-skla-v-cr.html>
19. Shi C., Ling T.-C., Liu Z.-Y.: *Cem. Concr. Res.* 130, 105965 (2020).
20. Matos A.M., Sousa-Coutinho J.: *Constr. Build. Mater.* 36, 205 (2012).
21. Schwarz, M., Camiletti, J., & Afshinnia, K. (2015). Waste glass as binder. *Construction and Building Materials*.
22. Jiang, Y., et al. : *Resources, Conservation & Recycling*, 141 (2019).
23. Lin, K. L., Lin, D. F.: *Cem. Concr. Res.* 28(9) (2006).
24. Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D.: *Cem. Concr. Res.* 30, 91 (2000).
25. Poudel S., Tamang S., Gautam S., Bhattarai P., Neupane K., Adhikari S.: *Buildings*, 15(6) (2025).

Utilization of Waste Glass for Partial Replacement of Cement in Cementitious Composite According to ČSN EN 196-1

Aleš PALIČKA, Zdeněk PROŠEK

Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Thákurova 7, 166 29
Prague 6, Czech Republic

Summary

This paper presents an experimental assessment of the potential use of finely ground waste glass as a secondary raw material for partial replacement of Portland cement in cement-based composites. The study aimed to evaluate the effect of different dosages of waste glass powder (WGP) on mechanical properties (compressive strength, flexural tensile strength, and dynamic modulus of elasticity) and selected microstructural characteristics. Standard cement paste mixtures were prepared in which cement was replaced by WGP at 10 – 50 wt.%, and the results were compared with a reference mixture without replacement. The tests showed a decrease in strengths and dynamic modulus of elasticity with increasing WGP content, with the most pronounced changes already observed at lower replacement levels. Microstructural analysis (SEM/EDS) confirmed good mechanical integration of glass particles within the cement matrix. The results provide experimental input for optimizing mixture design with WGP (e.g., by adjusting fineness or combining it with other reactive supplementary materials) and support the material valorization of waste glass within the framework of a circular economy in the construction sector.

Keywords: Waste Materials, Waste Glass, Recycling, Mechanical Properties, Cement

Symposium

Výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii ODPADOVÉ FORUM 2026

K datu uzávěrky přihlášek příspěvků je přihlášeno 79 příspěvků. Program 3 dnů je zcela naplněný, dokonce jsme museli zkrátit čas na přednášku z tradičních 20 minut (i s diskusí) na 15 minut.

Níže uvádíme přehled všech přihlášených příspěvků k 9. 3. 2026. Stejný přehled spolu se souhrny jednotlivých příspěvků je vystavený na stránkách symposia www.tvip.cz a je zde i vystaven předběžný program. Pokud by někdo chtěl dodatečně přihlásit přednášku, je třeba to konzultovat s pořadatelem (prochazka@cemc.cz nebo studentv@cemc.cz), jestli se ještě někam do programu vejde. Dodatečné přihlášení vývěsek je bez problému!

Symposium ODPADOVÉ FORUM 2026 se koná spolu s konferencí APROCHEM v rámci **Týdne výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2026 21. – 23. 4. 2026 v Hustopečích** u Brna. **Termín pro přihlášení se k účasti je 31. 3. 2026.** V přihlašovacím formuláři se současně vyznačuje požadovaný rozsah ubytování a stravy. I po uvedeném datu je možné se přihlásit, ale pořadatelé nezaručují již objednané ubytování.

Zve

Ing. Ondřej Procházka, CSc., programový garant symposia

Číslo Název příspěvku, autoři, instituce

- 100 **Energetické zhodnocení zbytků ze školních jídelen: cesta k obnovitelné energii prostřednictvím anaerobní digesce**
Ing. Petra Wojnarová, Ph.D., Ing. Barbora Grycová, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, CEET, IET
- 101 **Upcycling pečiva a snižování uhlíkové stopy**
Ing. Eva Hermannová, Albert ČR
- 102 **Využití vedlejších produktů ze zpracování ryb**
Ing. Radek Gebauer, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, FROV, Ing. Zdeněk Fuka, Fimex, s.r.o.; Ing. Zdeňka Machová; Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, FROV, Ing. Jan Hora, Kateřinský dvůr, s.r.o.; Ing. Aleš Tomčala, Ph.D., doc. Ing. Jan Mráz, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, FROV
- 103 **Nakládání s odpady a vodou v cukrovarech**
Ing. Martin Kolář, Ph.D., Tereos TTD, a. s.
- 104 **Vedlejší rostlinné produkty a jejich využití v potravinářské výrobě: potenciál a rizika**
Ing. Jan Bedrníček, Ph.D., Ing. František Lorenc, Ph.D., doc. Ing. Pavel Smetana, Ph.D., Hang Vo Thi Thu, MSc., Bc. Oksana Kraus, Ing. Barbora Bílková, Ing. Eva Petrášková, Ph.D., doc. Ing. Veronika Bártová, Ph.D., Ing. Markéta Jarošová, Ph.D., doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, FZT
- 105 **Cirkulární zhodnocení vedlejších produktů ze zpracování sladkovodních ryb na potravinářské výrobky**
Doc. Jan Mráz, Ph.D., Mgr. Magdalena Marešová, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, FROV, Jihočeské výzkumné centrum akvakultury a biodiverzity hydrocenóz; prof. Věra Adámková, Institut klinické a experimentální medicíny; Ing. Jan Hora, Tilápia, s.r.o.; Ing. Zdeněk Fuka, Fimex, s.r.o.
- 106 **Potenciál sladového květu a odpadních pivovarských kvasnic jako biostimulantu pro rostliny**
Ing. Karel Fous, prof. Ing. Tomáš Brányík, Ph.D., Ing. Martin Dušek, Ph.D., Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, a.s.; Ing. Jiří Mach, doc. Ing. Martin Halecký, Ph.D., VŠCHT v Praze; Ing. Radoslav Koprna, Ph.D., Mgr. Zdeněk Špíšek, Ph.D., Mgr. Jan Humplík, Ph.D., Univerzita Palackého v Olomouci
- 107 **Bezpečnost potravinářských obalů s recykláty**
Ing. Jitka Sosnovcová, Státní zdravotní ústav

- 108 **Využití živočišných odpadů pro výrobu cílených hnojiv**
Ing. Magdalena Caklová, Ph.D., ÚCHP AVČR, v.v.i.; Ing. Radoslav Kopra, Ph.D., Univerzita Palackého v Olomouci; Ing. Zdeněk Jandajsek, RABBIT Trhový Štěpánov a.s.; Ing. Milena Rousková, Ph.D., Ing. Stanislav Šabata, ÚCHP AVČR, v.v.i.
- 109 **Potravinové odpady jako zdroj: role výzkumu CEVOOH a projektu NAPO v transformaci odpadového hospodářství**
Ing. Dagmar Vološinová, Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, v. v. i.
- 110 **Hmyzí frass: perspektivní organické hnojivo**
Ing. Kateřina Šebelová, Ing. Ondřej Pospíšil, Bc. Štěpánka Syrovátková, doc. Dr. Ing. Věra Schulzová, VŠCHT v Praze; Ing. Pavel Kouřimský; Ing. Marie Maňasová, Ph.D., prof. Ing. Lenka Kouřimská, Ph.D., ČZU v Praze; prof. Ing. Jana Hajšlová, CSc., VŠCHT v Praze
- 111 **Odpad jako příležitost: Od energetického využití odpadních vod po cirkulární potenciál odpadních surovin**
Ing. Lenka Carová Mátlová Ph.D., Veolia Holding Česká republika, a.s.
- 112 **Na startu s výrobkem z recyklovaného dřeva**
Ing. Marek Polášek, Ph.D., Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, s.p.
- 113 **Vývoj plošného tepelně-izolačního materiálu na bázi vypěněného recyklovaného dřeva ze stavebních demolic jeho charakteristiky**
Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D., Ing. Kryštof Kubista, ČZU v Praze, FLD
- 114 **Fyzikálne a mechanické vlastnosti jednovrstvových drevogumených a drevoplastových kompozitov**
Ing. Vladimír Mancel, Ph.D., prof. h.c. prof. Ing. Jozef Krilek, Ph.D., Technická univerzita vo Zvolene
- 115 **Reuse dřeva z demolic jako součást lokálního materiálového systému**
Tomáš Mrkvica, Cirkulární centrum Hradec Králové / FortArt, z.s.
- 116 **Chemické zpracování lignocelulózových materiálů**
Ing. Kateřina Hájková, Ph.D., ČZU v Praze
- 117 **Matematické modelování velikosti částic lignocelulózové biomasy při mletí**
Ing. Michal Vtípil, doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta strojní
- 118 **Recyklace odpadního dřeva při výrobě aglomerovaných materiálů**
Ing. Rostislav Habán, KRONOSPAN CR, s.r.o.; Bc. Petr Koubek, SILVA CZ, s.r.o.
- 119 **Kolik životů má nábytek?**
Anika Chalupská, Reuse federace
- 120 **Ochrana osob před nebezpečnými radionuklidy obsaženými v radioaktivních odpadech**
Doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc., Policejní akademie ČR v Praze
- 121 **Kvantifikace ozáření osob a jeho monitorování v případě ozáření v důsledku radioaktivních odpadů**
Doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc., RNDr. Ing. Jaroslav Kočvara, MBA, Policejní akademie ČR v Praze
- 122 **Spracovanie vysýtených rádioaktívnych sorbentov z prevádzky a vyradovania jadrových zariadení**
Ing. Róbert Horúcka, Jadrová a vyradovacia spoločnosť, a. s.; doc. RNDr. Eva Viglašová, Ph.D., prof. RNDr. Michal Galamboš, Ph.D., Univerzita Komenského v Bratislave, KJD
- 123 **Zpracování radioaktivních odpadů na jaderných elektrárnách v ČR**
Ing. Eva Popelová, Ph.D., Ing. František Huptych, ENERGOPROJEKT PRAHA, s.r.o.
- 124 **Odstraňování uranu z pitné vody - nakládání s nasycenými ionexovými náplněmi**
Ing. Oldřich Tomášek, Ing. Hana Procházková, Státní ústav pro jadernou bezpečnost
- 125 **Transformace nebezpečného azbestocementového odpadu na bezpečné funkční produkty**
RNDr. Theodor Staněk, Ph.D., Ing. Martin Nguyen, Ph.D., Mgr. Michaela Krejčí Kotlánová, Ph.D., Ing. Zdeněk Krejza, Ph.D., Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s.; Ing. Jiří Holub, LB Cemix, s.r.o.
- 126 **Porovnanie systemov optického a robotického triedenia s použitím učenia prostr. AI**
Ing. Robert Procházka, MBA, PhD., VÚMZ SK, s.r.o., Nitra
- 127 **Centrum energetického zhodnotenia odpadov v rafinérii Slovnaft**
Ing. Barbora Čerňanská, Slovnaft, a.s.

- 128 **ElCuRe – Electroforming Cu Recycling**
Dr.rer.nat. Kateřina Bartošová, prof. Ing. Karel Dušek, Ph.D., ČVUT v Praze, FEL; doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D., Electroforming, s.r.o.; Ing. Bc. Marek Neruda, Ph.D., Ing. Petr Veselý, Ph.D., Ing. Vojtěch Vigner, Ph.D., Ing. Pavel Hrzina, Ph.D., ČVUT v Praze, FEL; Ing. Radek Tuček, Electroforming, s.r.o.
- 129 **Fluorescenční markery jako nástroj ke zlepšení nakládání s plastovým odpadem**
Ing. Denisa Filipi, prof. Ing. Michal Veselý, CSc., VUT v Brně, Fakulta chemická
- 130 **Mikropolutanty a PFAS v odpadních vodách a jejich odstraňování: legislativní požadavky a praktické zkušenosti**
Prof. RNDr. Luděk Bláha, Ph.D. a kol., Masarykova univerzita Brno, RECETOX, PřF
- 131 **Optimalizace procesu vermikompostování akvakulturních kalů**
Ing. Pavel Franta, Ph.D., MSc. Anil Axel Tellbüscher, Zuzana Stoklasová, doc. Ing. Jan Mráz, Ph.D., Bc. Karel Procházka, Ing. Radek Gebauer, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, FROV
- 132 **Strategické prvky v Českých popílcích**
Ing. Pavel Sokol, Ph.D., ASAM, z.s.
- 133 **Valorizace odpadní biomasy pro další využití**
Ing. Jan Moravčík, Ing. Karel Soukup, Ph.D., ÚCHP AV ČR; Ing. Jaroslav Kocík, Ph.D., ORLEN Unipetrol, a.s.; Mgr. Luděk Kaluža, Ph.D., ÚCHP AV ČR
- 134 **Využití odpadního plastového materiálu na výrobu desek plošných spojů alternativním způsobem**
Ing. Denis Froš, Ph.D., Mgr. Kateřina Bartošová, Dr. rer. nat., Ing. Petr Veselý, Ph.D., ČVUT v Praze, FEL; Ing. Alena Kadeřábková, Ph.D., Ing. Drahomír Čadek, Ph.D., VŠCHT v Praze, FCHT
- 135 **Vývoj technologie čištění a znovuvyužití odpadních vod z procesu moření oceli**
Mgr. Milena Johnová, Ing. Tomáš Lederer, Ph.D., Ing. Magda Nechanická, Ph.D., TU v Liberci; Ing. Tomáš Čuboň, Ing. Aleš Herma, EKOMOR, s.r.o.; Ing. Dorota Horová, ORLEN UniCRE, a.s.
- 136 **Hodnocení environmentálních a technologických vlastností škváry z energetického využívání odpadů z pohledu její využitelnosti při výstavbě pozemních komunikací**
Ing. Ivana Chromková, MVDr. Ilona Kukletová, Ph.D., Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s.; Ing. Jiří Grošek, Ph.D., Ing. Tomáš Zavřel, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.; RNDr. Jana Suzová, Ing. Jan Salnek, SAKO Brno, a.s.
- 137 **Aplikace nízkonákladových sorbentů pro čištění odpadních vod**
Ing. Jaroslav Vacula, Ph.D., Bc. Oleksandra Vorobiova, Ing. Adam Sochackí, Ph.D., doc. Ing. Lenka Wimmerová, MSc., Ph.D., ČZU v Praze; Ing. Olga Šolcová, CSc. DSc., ÚCHP AV ČR
- 138 **Ekologická alternativa plastových pěn pro použití v přírodě**
Ing. Martina Dlasková, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; Anshu Shaw, MSc., Ing. Lenka Wimmerová, MSc., Ph.D., Ing. Jaromír Hradecký, Ph.D., ČZU v Praze; Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., ÚCHP AV ČR, v.v.i.
- 139 **Ekologická likvidace elektrotechnických odpadů**
Prof. Ing. Milan Čárský, CSc., ÚCHP AVČR, v.v.i.; Ing. Marek Jadlovec, Ph.D., VŠB-TU Ostrava; Ing. Karel Soukup, Ph.D., Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., ÚCHP AV ČR; Tomáš Pešek, REMA Systém, a.s.
- 140 **Z každého odpadu může být cenná surovina**
Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., Ing. Martina Dlasková, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; doc. Ing. Petr Kaštánek, Ph.D., Ecofuel Laboratories, s.r.o.; prof. Ing. Jana Hajšlová, CSc., VŠCHT v Praze; Ivan Papoušek, Papek, s.r.o.
- 141 **Zelená transformácia v praxi: Proces recyklácie lítium-iónových batérií v závode v Osle**
Ing. Matej Kuba, BTS & Saker sp. z o.o.
- 142 **Recyklace provozních kapalin automobilů a jedno české unikum**
Ing. Jan Skolil, Ph.D., CLASSIC OIL, s.r.o.
- 143 **Proč je druhý život pneumatik klíčový pro odpovědnou ochranu životního prostředí?**
Assoc. Prof. Dr.-Ing. Radek Stoček, Ing. Martin Stěnička, Ph.D., Sanjoy Datta, Ph.D., Ing. Ondřej Kratina, Ph.D., Evghenii Harea, Ph.D., Ing. Marek Poschl, Ph.D., UTB ve Zlíně, CPS, Univerzitní Institut, Centrum polymerních systémů
- 144 **Environmental Performance of Wood-Plastic Composites: A Study of VOC Emissions in Indoor Environments**
Ing. Anna Darabošová, Ph.D., Ing. Tatiana Bubeníková, Ph.D., doc. Ing. Iveta Čabalová, Ph.D., TU vo Zvolene
- 145 **Recyclace pneumatik - výstavba dětských a sportovních hřišť**
RNDr. Filip Jaroš, MUDr. Magdalena Zimová, CSc., Státní zdravotní ústav

- 146 **Recyklace stavebního skla a autoskel**
Ing. Pavel Berka, REMAT GLASS, s.r.o.
- 147 **Energetické zhodnocovanie textílií automobilových interiérov pomocou pyrolýzy**
Ing. Marek Patsch, Ph.D., Ing. Peter Pilát, Ph.D., prof. Ing. Jozef Jandačka, Ph.D., Žilinská univerzita v Žiline
- 148 **Plasty, o kterých se nemluví**
Ing. David Hausner, Plastičářský klastr, z.s.
- 149 **Výskum tepelno a zvukovo izolačných materiálov na báze recyklovaných textilných materiálov z automobilového priemyslu**
Doc. Ing. Lýdia Sobotová, Ph.D., Dr. h.c.mult. prof. Ing. Miroslav Badida, Ph.D., Ing. Anna Badidova, Ph.D., Ing. Marek Moravec, Ph.D., TU v Košiciach, Strojnícka fakulta
- 150 **Environmentálne vplyvy drevných kompozitov s obsahom recyklovaných plastov na vodné prostredie.**
Doc. Ing. Helena Hybská, Ph.D., prof. Ing. Dagmar Samešová, Ph.D., doc. Ing. Iveta Čabalová, Ph.D., prof. Ing. Jozef Krilek, Ph.D., TU vo Zvolene
- 151 **Představení projektu INERRANT "Integrating Novel Materials with Scalable Processes for Safer and Recyclable Li-ion Batteries"**
Doc. Ing. Jiří Orava, Ph.D., Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, FŽP
- 152 **reTIRE: Od odpadu k surovině – pyrolýza jako pilíř evropské i národní cirkularity pneumatik**
Ing. Jan, Janoušek, SUAS reTIRE, s.r.o.
- 153 **Možnosti recyklace stropnic osobních automobilů**
Ing. Petr Montág, BASF spol. s r.o., doc. Ing. Alena Kalendová, Ph.D., UTB ve Zlíně, FT, UIP
- 154 **Alternativní média z peří a mláta pro recyklaci demoliční suti**
Ing. Henrietta Ottová, doc. Ing. Hana Stiborová, Ph.D., prof. Ing. Kateřina Demnerová, CSc., VŠCHT v Praze; doc. Ing. Václav Nežerka, Ph.D., Ing. Petr Holeček, Ph.D., ČVUT v Praze; Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., Ing. Karel Soukup, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.
- 155 **Fotoreformování mikroplastů pomocí UV fotolýzy a fotokatalýzy za vzniku vodíků**
Ing. Miroslava Filip Edelmannová, Ph.D., prof., Ing. Petr Praus, Ph.D., doc., Ing. Lenka Řeháčková, Ph.D., Ing. Rudolf Ríčka, Ph.D., doc., Ing. Michal Ritz, Ph.D., Ing. Kamila Kočí, Ph.D., VSB-TU Ostrava
- 156 **Kukuričná vláknina z výroby škrobu ako nedrewná surovina pri výrobe papiera**
Ing. Andrej Pažitný, Ph.D., Ing. Juraj Krišta, Ing. Vladimír Ihnát, Ph.D., Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. v Bratislave
- 157 **Kultivace mikrořas jako terciární stupeň čištění komunálních odpadních vod s produkcí biomasy**
RNDr. Kateřina Bišová, Ph.D., Abdullah Enes Göksal, MSc., Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i., Centrum Algatech
- 158 **Kvasinková biomasa jako nástroj transformace digestátu a kejdy na funkční biohnojivo**
Mgr. Martin Diviš, Ing. Ivana Laknerová, Ing. Marian Urban, Ph.D., RNDr. Martin Svoboda, Ph.D., Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v.v.i.
- 159 **Likvidace komunálních odpadů pro energetické využití**
Ing. Stanislav Šabata, prof. Ing. Milan Čárský, CSc., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; Ing. Marek Jadlovec, Ph.D., VŠB-TU Ostrava; Ing. Karel Soukup, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; Ing. Jan Červený, Ph.D., Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.; Tomáš Pešek, REMA Systém a.s.; Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., ÚCHP AV ČR, v.v.i.
- 160 **Prezentace projektu - Recyklace SDO ve společnosti PEDOP s.r.o.**
Josef Pernica, PEDOP s.r.o.; Ing. Marek Koplík, SVI AJAK services, s.r.o.
- 161 **Prezentace projektu Zpracování SDO na druhotné suroviny**
Vladimír Dostál, Vladimír Dostál - zemní práce, autodoprava, s.r.o.; Ing. Marek Koplík, SVI AJAK services, s.r.o.
- 162 **Příprava izolačního materiálu z odpadních směsných textilních vláken**
Ing. Patrik Rous, ORLEN Unipetrol, a.s.; Ing. Markéta Spáčilová, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; Jaroslav Hudek, Ing. Lenka Skuhrovcová, Ph.D., ORLEN Unipetrol a.s.; Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., ÚCHP AV ČR, v.v.i.
- 163 **Recyklace třísek z obrábění PUR modelových bloků**
Ing. Filip Havlíček, Ing. Islam Gimadiev, prof. Ing. Petr Mohyla, Ph.D., Ing. Marek Harok, Ing. Marek Beseda, Ph.D., Ing. Jan Rygel, Ing. Pavel Klaus, Ph.D., Ing. Michal Weisz, Ph.D., VŠB-TU Ostrava

- 164 **Účinnost technologie CaviPlasma při degradaci léčiv a ekotoxikologické posouzení ošetřené vody**
Ing. Klára Odehnlová, Ph.D., Ing. Eliška Maršálová, Ph.D., Botanický ústav AV ČR, v. v. i.; Mgr. Radek Horňák, doc. Mgr. Pavel Šťáhel, Ph.D., Masarykova univerzita, Ústav fyziky a technologií plazmatu; doc. Ing. Pavel Rudolf Ph.D., VUT v Brně, FSI; prof. Ing. Blahoslav Maršálek, CSc., Botanický ústav AV ČR, v. v. i.
- 165 **Udržitelná výroba vodíku z odpadní biomasy: integrovaný řetězec anaerobní digesce, plazmové konverze a membránové separace**
Ing. Petra Wojnarová, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, CEET
- 166 **Vývoj přípravku na podporu růstu rostlin s využitím odpadních materiálů a endofytních bakterií**
Ing. Lenka Morávková, ÚCHP AV ČR, v.v.i.; prof. Dr. Ing. Petra Patáková, Ing. Tomáš Hašek, doc. Ing. Petra Lovecká, Ph.D., VŠCHT v Praze; Ing. Zdeněk Jandajsek CSc., Rabbit, a.s., Trhový Štěpánov; prof. Ing. Karel Melzoch, CSc., VŠCHT v Praze; Ing. Olga Šolcová, CSc., DSc., Ústav chemických procesů AVČR, v.v.i.
- 167 **Získávání cenných látek z rostlinných materiálů**
Ing. Milena Rousková, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; doc. Ing. Petr Kaštánek, Ph.D., Ecofuel Laboratories, s.r.o.; Ing. Jan Konečný, První jílovská, a.s.; prof. Ing. Jana Hajšlová, CSc., VŠCHT v Praze; prof. Ing. Tomáš Brányík, Ph.D., Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, a.s.; Ing. Radoslav Koprna, Ph.D., Univerzita Palackého v Olomouci
- 168 **Možnosti aplikace renovovaných fotovoltaických panelů**
Prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc., ČVUT v Praze, FEL; Ing. Karel Soukup, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; Tomáš Pešek, REMA Systém, a. s.; Ing. Bc. Kamila Vávrová, Ph.D., Výzkumný ústav pro krajinu, v. v. i.
- 169 **Cirkularita v praxi: indikátor systémového úsilí v nakládání s odpady**
Ing. Jaroslav Pluskal, Ph.D., doc. Ing. Radovan Šomplák, Ph.D., Ing. Vlastimír Nevrlý, Ph.D., VUT v Brně
- 170 **Vliv mobility obyvatel na produkci komunálního odpadu**
Doc. Ing. Radovan Šomplák, Ph.D., Ing. Jaroslav Pluskal, Ph.D., Ing. Vlastimír Nevrlý, Ph.D., VUT v Brně
- 171 **Radioaktivní odpady vznikající během provozu fúzního zařízení**
Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadálová, Ph.D., Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., Centrum výzkumu Řež, s.r.o.
- 172 **Příprava k ukládání radioaktivních odpadů pocházejících z jaderné fúze**
Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadálová, Ph.D., Ing. Lumír Nachmilner, CSc., Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D., Centrum výzkumu Řež, s.r.o.
- 173 **Nakládání s odpadem s obsahem přírodních radionuklidů v praxi**
Ing. Kateřina Navrátilová Rovenská, PhD., RNDr. Ivana Ženatá, Ing. Hana Vojtěchová, Státní ústav radiální ochrany, v.v.i.
- 174 **Ekonomické dopady prechodu na výrobu elektromobilov na Slovensku**
Prof. Ing. Martin Lábaj, PhD., Ekonomická univerzita v Bratislave
- 175 **Trhom vedený predaj ECVs a regulácia trhu EÚ: výzvy a otvorené otázky**
Prof. Ing. Pavol Ochoťnícky, PhD., Ing. Matej Boor, PhD., doc. Ing. Katarína Belanová, PhD., Ing. Marcela Rabatínová, PhD., Rudolf Sivák, Ekonomická univerzita v Bratislave
- 176 **Inovatívne tvarové tepelnoizolačné prvky vyrobené z recyklovanej polyuretánovej peny**
Miloš Matúš, Ľubomír Šooš, Jozef Bábits, Richard Šupík, STU v Bratislave, Strojnícka fakulta
- 177 **Technology research of decomposition of multilayer car glassies**
Ľubomír Šooš, Viliam Čačko Miloš Matúš, Jozef Babics, STU v Bratislave, Strojnícka fakulta
- 178 **Znižovanie dopravného hluku pomocou inovatívnych absorberov vyrobených na báze recyklovaných materiálov z automobilov po dobe ich životnosti**
Miroslav Badida, Marek Moravec, Lýdia Sobotová, Anna Badidová, M. Piňosová, TU v Košiciach
-

ODBORNÝ PORTÁL zaměřený na průmyslovou ekologii



TretiRuka.cz

Více času na podstatné!

- ✓ Legislativa a dotace
- ✓ Věda a výzkum
- ✓ Odborné akce
- ✓ Veřejné zakázky
- ✓ Aktuální informace a novinky



140 000 NÁVŠTĚVNÍKŮ MĚSÍČNĚ

Pomocná ruka při řízení Vašeho podnikání
z pohledu životního prostředí.
Efektivní nástroj pro Vaše PR.

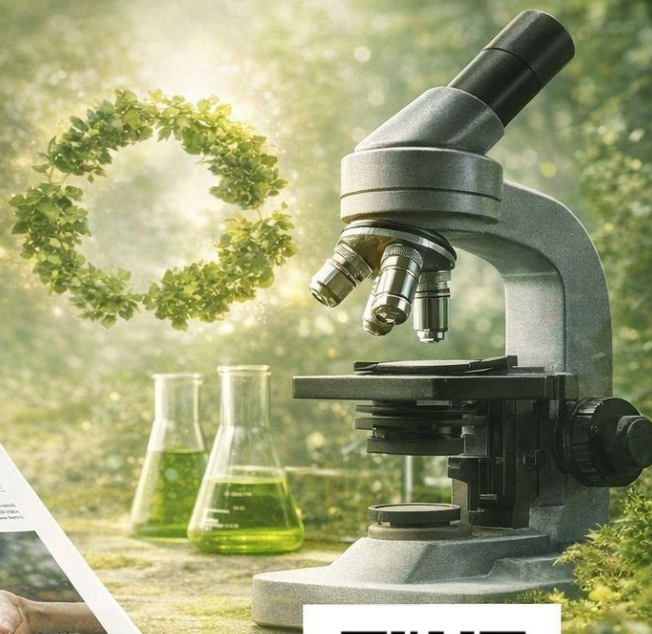


www.TretiRuka.cz

ODPADOVÉ FÓRUM

ODPADY - EKOLOGIE - UDRŽITELNOST

Publikujte své odborné práce!



OBJEDNAT PŘEDPLATNÉ

www.OdpadoveForum.cz