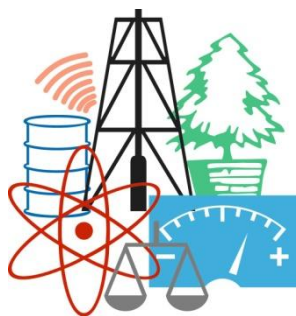


# WASTE FORUM



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

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

YEAR 2021

No. 3

Pages 149 – 211

***Patron od the issue / Patron čísla***

***Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí 2020/2021***  
zahrnující  
symposium ODPADOVÉ FÓRUM 2020/2021 a  
konferenci APROCHEM 2021  
***[www.tvip.cz](http://www.tvip.cz)***

© Czech Environmental Management Center 2021

## OBSAH / INDEX

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Úvodní slovo šéfredaktora / Editorial                                                                                                        | 151 |
| Editorial                                                                                                                                    | 151 |
| Pro autory / For authors                                                                                                                     | 152 |
| Bioeconomy in the Development Context of the Sustainability Global Concept                                                                   | 153 |
| Bioekonomika v kontextu rozvoje globální koncepce udržitelnosti                                                                              |     |
| <i>Pavla VRABCOVÁ, Hana URBANCOVÁ, Martin ŘEHOŘ, Dominika KADEŘÁBKOVÁ</i>                                                                    |     |
| Ecotoxicological effects of the leachate from the waste tires on the environment                                                             | 166 |
| Ekotoxikologické účinky výluhu z použitých pneumatik na životné prostredie                                                                   |     |
| <i>Helena HYBSKÁ, Dagmar SAMEŠOVÁ, Martina LOBOTKOVÁ</i>                                                                                     |     |
| Současné možnosti zvyšování využití stavebního a demoličního odpadu ve stavebnictví                                                          | 176 |
| Current possibilities of increasing the use of construction and demolition waste in construction                                             |     |
| <i>Zdeněk PROŠEK, Tereza PAVLŮ, Milan RYDVAL, Jan VALENTIN, Martin LIDMILA, George KARRA'A, Jiří PODOLSKÝ, Jan FOLTÝN, Pavel TESÁREK</i>     |     |
| Study of changes in surface properties of zeolite due to modifications                                                                       | 187 |
| Štúdium zmien povrchových vlastností zeolitu v dôsledku jeho úprav                                                                           |     |
| <i>Lucia DOMARACKÁ, Marcela TAUŠOVÁ, Ladislav HVIZDÁK, Pavol RYBÁR, Mária DREVKOVÁ</i>                                                       |     |
| Verification of the dependence of CO, CO <sub>2</sub> and NO <sub>x</sub> emission concentrations on vehicle ride dynamics and route profile | 199 |
| Ověření závislosti koncentrace CO, CO <sub>2</sub> a NO <sub>x</sub> na dynamice jízdy vozidla a profilu trasy                               |     |
| <i>Petra PROCHÁZKOVÁ</i>                                                                                                                     |     |
| <b>Komerční prezentace / Commercial presentation</b>                                                                                         |     |
| Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2020/2021                                                                         | 209 |

WASTE FORUM – recenzovaný časopis pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii / electronic peer-reviewed journal for industrial and municipal ecology  
ISSN: 1804-0195; www.WasteForum.cz. Vychází čtvrtletně / It is published quarterly.  
Vychází od roku 2008, od roku 2017 je indexován v databázi SCOPUS / Journal is issued since 2008, since 2017 it is indexed in the Scopus database.  
Ročník 2021, číslo 3 / Year 2021, Issue 3  
Vydavatel / Publisher: CEMC – České ekologické manažerské centrum, z.s., IČO: 45249741, www.cemc.cz  
Adresa redakce / Editor's address: CEMC, ul. 28. pluku 524/25, 101 00 Praha 10, Czech Republic, fax: (+420) 274 775 869  
Šéfredaktor / Editor-in-chief: Ondřej Procházka, Ph.D., tel.: (+420) 723 950 237, e-mail: [prochazka@cemc.cz](mailto:prochazka@cemc.cz)  
Redakční rada / Editorial board: Ing. Vratislav Bednařík, CSc.; doc. Ing. Vladimír Čablík, Ph.D.; prof. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc.; prof. Ing. Tomáš Havlík, DrSc.; prof. Ing. František Hrdlička, CSc.; Ing. Slavomír Hredzák, CSc.; doc. Ing. Emília Hroncová, PhD.; prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.; prof. Ing. František Kaštánek, CSc.; prof. Ing. Mečislav Kuraš, CSc.; prof. Mgr. Juraj Ladomerský, CSc.; prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.; prof. Norbert Miskolczi; prof. Ing. Lucie Obalová, Ph.D.; Ing. Miroslav Punčochář, CSc., DSc.; Ing. Klára Slezáková, PhD.; Ing. Lenka Svecova, Ph.D.; doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.; prof. Ing. Lubomír Šooš, PhD.; prof. dr. hab. inž. Barbara Tora, Ing. Hana Urbancová, PhD., Ing. Pavla Vrabcová, Ph.D.  
Web-master: Ing. Vladimír Študent  
Redakční uzávěrka / Issue's deadline: 8. 7. 2021. Vychází / Disclosed: 10. 9. 2021



## Úvodní slovo šéfredaktora

Vážení čtenáři,

v předmluvě minulého čísla jsem psal o stavu naší žádosti o zařazení WF do databáze WoS. Od té doby nic nového a dle dosavadních mých zkušeností hned tak nebude.

V souvislosti řešením WoS mi redakční rada doporučila pokusit se dostat WASTE FORUM do databáze open-access časopisů DOAJ. Zkusil jsem to a první pokus se rovněž nezdařil s odůvodněním, že je třeba, aby jednotlivé příspěvky bylo možné v PDF stáhnout samostatně. Dosud bylo nutné stahovat vždy celé číslo. Naštěstí toto bylo technicky snadno realizovatelné a tak počínaje letošním ročníkem lze stáhnout jak celé číslo, tak z obsahu daného čísla otevřít či stáhnout jen zájmový příspěvek. Hned po dokončení tohoto čísla se o zařazení časopisu do DOAJ pokusím znovu.

Již minule jsem vás na tomto místě zval na Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2020/2021, který se koná v náhradním termínu 19. – 21. 10. 2021 v Hustopečích v hotelu Amande. Jak známo, v rámci TVIPu se koná konference APROCHEM, zaměřená na rizikový management, a symposium Výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii ODPADOVÉ FÓRUM, jehož odborným garantem je tento časopis.

Z původního programu tohoto odborného setkání se odhlásilo jen minimum příspěvků a naopak další přibýly. Aktuální program najdete [ZDE](#). V případě zájmu o dodatečné přihlášení příspěvku je nutné to konzultovat s pořadateli ([studentv@cemc.cz](mailto:studentv@cemc.cz)), přičemž u vývěsek by to neměl být problém. Zájem o účast je nutné projevit vyplněním [přihlášky účasti](#), prostřednictvím které se rovněž objednávají související služby (ubytování, strava, účast na exkurzi), a to nejlépe do 15. 9. 2021. Více informací najdete zde na stranách 209 – 211 nebo na [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz), kde jsou všechny potřebné informace a kontakty, včetně přihlašovacích formulářů.

Ondřej Procházka

## Editorial

Dear readers,

Wondering why to publish in the [WASTE FORUM](#) magazine, which is in SCOPUS but does not have an impact factor? It's because:

1. The your paper, if it is of good quality and passes the review, is published no later than 10 weeks after the editorial deadline;
2. The journal is open access, which means that it can be accessed by your colleagues from all over the world and we have verified that this is indeed the case. Regularly, most downloads of all issues are from readers from the largest countries in the world, here the USA, Russia and China.

Finally, I would like to remind you that 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](#) on [www.WasteForum.cz](http://www.WasteForum.cz).

Regards

Ondřej Procházka

## Pro autory

WASTE FORUM je časopis určený pro publikování původních vědeckých prací souvisejících s průmyslovou a komunální ekologií. Tj. nejen výsledků výzkumu v oblasti odpadů a recyklace, jak by mohl naznačovat název časopisu, ale i odpadních vod, emisí, sanací ekologických zátěží atd. Časopis vychází pouze v elektronické podobě a čísla jsou zveřejňována na volně přístupných internetových stránkách [www.WasteForum.cz](http://www.WasteForum.cz), tzn. je tzv. open access.

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](http://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 spoluautor. 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 500 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. října 2021, další pak 8. ledna 2022.***

## 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.

**The publication language is 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](mailto: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 ***Not peer-reviewed and commercial papers.***

Revenue to cover at least the costs associated with the issuance of the magazine, we select a [publication fee](#) 500 CZK per each new page of the paper.

***The deadline of the next issue is on October 8, 2021, more on January 8, 2022.***

# **Bioeconomy in the Development Context of the Sustainability Global Concept**

**Pavla VRABCOVÁ<sup>a</sup>, Hana URBANCOVÁ<sup>b</sup>, Martin ŘEHOŘ<sup>c</sup>,  
Dominika KADEŘÁBKOVÁ<sup>d</sup>**

*University of Economics and Management, Nárožní 2600/9a, 158 00 Prague 5, Czech Republic,*

<sup>a</sup> *Department of Management, corresponding author, e-mail: pavla.vrabcova@vsem.cz*

<sup>b</sup> *Department of Human Resources, e-mail: hana.urancova@vsem.cz*

<sup>c</sup> *Department of Management, e-mail: martin.rehor@vsem.cz*

<sup>d</sup> *Department of Human Resources, e-mail: dominika.kaderabkova@vsem.cz*

## **Summary**

*The primary topic of sustainable development is the relationship between humans and nature, or human settlements and landscapes. Given the pressing needs, the science of sustainability and bioeconomy, being a multidisciplinary field, can be expected to play an important role in acquiring expert knowledge and contributing to the realization of sustainable society. Sustainable development together with bioeconomy is part of the mission of international, national, supranational organizations and institutions, cities, municipalities, as well as non-governmental organizations. The main goal is to provide a comprehensive overview of definitions that have been presented in the global context of sustainability, to identify the main development milestones when defining this phenomenon and to evaluate the links to bioeconomy. The partial goal is to identify the approaches of selected Czech organizations to sustainable business. The literature search of sources is performed along with the bibliographic analysis of the internationally used term 'bioeconomy'. Primary data were obtained through the quantitative research in the form of a questionnaire survey (n = 183) and through the qualitative research using focus groups and individual interviews (n = 8). The content analysis revealed a terminological inconsistency and the need to formulate a bioeconomy strategy at the level of the CR.*

**Keywords:** *sustainability, triple bottom line, development concept, bibliographic analysis, organization, bioeconomy strategy*

## **Introduction**

For several decades, Mebratu<sup>1</sup> and Jabareen<sup>2, 3</sup> agree on the fact that the lack of a comprehensive theoretical framework does not allow for the understanding of the complexities of sustainable development. Due to the inadequate terminology, Neuwirth<sup>4</sup> even suggests another name, namely "development policy", which, in his opinion, is more inclusive and dynamic. Lozano<sup>5</sup> sees sustainability as a "goal", while he describes sustainable development as a "process" to achieve it. Prug and Assadourian<sup>6</sup> and Sartori et al.<sup>7</sup> further agree that sustainable development is required to achieve sustainability. In this sense, the so-called triple bottom line concept<sup>8, 9, 10, 11</sup>, which supports the assessment of overall business performance based on three important areas: profit, people, and planet, and which arose from the frustration with traditional, financially focused measures of business performance, cannot be overlooked.

The main goal is to provide a comprehensive overview of definitions that have been presented in the global context of sustainability, to identify the main development milestones in defining this phenomenon and to evaluate the links to the bioeconomy. The partial goal is to identify the approaches of selected Czech organizations to sustainable business. The article consists of five main parts – Introduction (introducing the topic, its topical nature, and deducing the goal), Theoretical Background, where the opinions of mostly foreign authors on the examined issue are compared, Results (presenting the results of the research conducted), and the final chapter called Discussion and Conclusion that only compares the results achieved by foreign researches with the results of the research presented, including recommendations for organizations engaged in sustainable business.

## Theoretical Background

It is evident that sustainable development is based on three pillars<sup>12</sup>: the concept of development (the socio-economic development in accordance with environmental constraints), the concept of needs (the allocation of resources to improve the quality of life) and the concept of future generations (the sustainable use of resources in accordance with the needs of future generations). Klarin<sup>12</sup> draws, besides other things, on the definition of the publication that was an important milestone focusing on diverse considerations concerning the relationship between humans and the environment, namely Our Common Future, published in 1987, also known as the Brundtland Report. Sustainable development has undergone fundamental changes and various stages of development throughout history. Table 1 below lists the most important milestones in the history of defining sustainable development and the essential activities related to the concept.

**Table 1: The overview of selected activities related to the global concept of sustainable development and its background since the 1960s**

| Year, event/institution, place                                                                                | Note                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1969, Man and His Environment was published                                                                   | The publication, which was written by nearly 2,000 scientists, focuses on activities aimed at preventing global environmental degradation.                                                                                                                           |
| 1972, the UN Conference on the Human Environment, Stockholm, Sweden                                           | The conference represents a crucial step in the development of sustainability and sustainable development concept. The Limits to Growth study was created as one of the documents for the conference. The principles of the Stockholm Declaration were adopted (26). |
| 1973, the International Union for Conservation of Nature (IUCN), Gland, Switzerland                           | In 1973, the IUCN defined the conservation of nature and natural resources as a way of managing natural resources and living organisms, including humans, to achieve the highest sustainable quality of life.                                                        |
| 1979, the First World Climate Conference, Geneva, Switzerland                                                 | The conference focused on the research in the field of climate change monitoring.                                                                                                                                                                                    |
| 1980, IUCN, United Nations Environment Programme (UNEP), World Wide Fund for Nature (WWF)                     | The creation of the World Conservation Strategy (WSC). This is the first document in which the concept of sustainable development is accepted.                                                                                                                       |
| 1981, the UN Conference on Least Developed Countries, Paris, France                                           | The outcome of this conference is a report with guidelines and measures to help the underdeveloped countries.                                                                                                                                                        |
| 1984, the United Nations World Commission on Environment and Development (WCED) was established               | Since the establishment of the WCED, a more comprehensive concept of the environment, i.e., the environmental and development issues on a global scale, has been pressed for.                                                                                        |
| 1987, WCED                                                                                                    | The study called Our Common Future (Brundtland Report) was published. It is a holistic concept, defining the term 'sustainable development' for the first time and linking it to the requirement of social equality.                                                 |
| 1987, the Montreal Protocol                                                                                   | The Protocol contains research results on substances that deplete the ozone layer.                                                                                                                                                                                   |
| 1990, the UN Centre for Human Settlements                                                                     | The People, Settlements, Environment and Development report was formulated, setting out a basic framework for the sustainable development of settlements.                                                                                                            |
| 1992, the United Nations Conference on Environment and Development (the Earth Summit), Rio de Janeiro, Brazil | 27 principles for sustainable development have been adopted within the Declaration on Environment and Development (the Earth Charter). Agenda 21 was established as a detailed action plan for the environmental protection.                                         |
| 1992, the adoption of Act No. 17/1992 Coll., on the Environment, Czech Republic                               | Josef Vavroušek pushed through the current definition of the principle of sustainable development as stated in Section 6 of the Environmental Act most.                                                                                                              |
| 1993, the UN Committee on Sustainable Development was established                                             | A year later, Europe 2000+ was published.                                                                                                                                                                                                                            |
| 1995, the founding of the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Geneva, Switzerland     | WBCSD is an international organization based in Geneva that brings participants from different business sectors and socio-economic spheres together.                                                                                                                 |
| 1997, the UN Climate Change Conference, Kyoto, Japan                                                          | After intensive negotiations, the Kyoto Protocol was adopted, outlining the obligation to reduce greenhouse gas emissions for selected countries.                                                                                                                    |
| 1998, the OECD Council meeting, Paris, France                                                                 | Sustainable development has been declared a priority for member governments. The key outcome of the conference is considered to be a three-year project resulting in the comprehensive publication called Sustainable Development - Critical Issues.                 |
| 2000, the Millennium Summit, New York, USA Summit                                                             | The Summit confirmed the concept of sustainable development set out in Rio de Janeiro in 1992. The so-called Millennium Development Goals (MDGs) were set.                                                                                                           |
| 2002, the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg, South Africa                                 | The creation of the Johannesburg Declaration on Sustainable Development, which provides an ideological framework and does not commit states to action.                                                                                                               |
| 2006, the renewed EU Strategy for Sustainable Development                                                     | In addition to identifying persistent unsustainable trends, the strategy addresses improving the lives of current and future generations through sustainable, resource-efficient communities.                                                                        |
| 2009, the World Climate Conference, Geneva, Switzerland                                                       | The World Climate Conference helped to further develop the global system for monitoring the climate change in order to early detect potential disasters.                                                                                                             |
| 2009, Summit G20, Pittsburg, USA                                                                              | G20 members concluded an agreement on a sustainable economy.                                                                                                                                                                                                         |
| 2012, the UN Conference on Sustainable Development Rio +20, Rio de Janeiro, Brazil                            | One of the outcomes of the conference is the final document known as 'The Future We Want'. The process of creating the 2030 Agenda began.                                                                                                                            |

|                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2012, the establishment of the Czech branch of WBCSD – the Czech Business Council for Sustainable Development (CBCSD) | The Czech branch of CBCSD cooperates with a number of national as well as international institutions and companies.                                                                                                                                                                                               |
| 2015, the UN Action Programme Addis Ababa, Ethiopia                                                                   | The United Nations Program of Action on Financing for Development, in which countries committed themselves to technology and innovation cooperation and reaffirmed their commitment to providing development assistance.                                                                                          |
| 2015, the UN Summit, New York, USA                                                                                    | The Sustainable Development Agenda was adopted by the UN Summit in New York in the document titled 'Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development', which includes the Sustainable Development Goals (SDGs).                                                                                |
| 2015, the adoption of the Paris Agreement                                                                             | The Paris Agreement was adopted by the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change. The Agreement implements the provisions of the UNFCCC and replaces the Kyoto Protocol after 2020.                                                                                                                |
| 2015, Vision 2050 of the Czech Republic from the perspective of the CBCSD                                             | The Vision aims for a long-term prosperous society, a growing quality of life, environmental protection, and social cohesion.                                                                                                                                                                                     |
| 2015, the Sendai Framework for Disaster Reduction 2015-2030                                                           | For the first time, the Sendai Framework implemented targets aimed at reducing the impacts of adverse events and natural disasters. The main ambition of the adopted Framework is to significantly reduce the number of fatalities, damage to key infrastructure and economic losses caused by disasters by 2030. |
| 2017, the Strategic Framework Czech Republic 2030                                                                     | The Framework set out long-term priorities in key areas. The aim is to improve the quality of life in the Czech Republic.                                                                                                                                                                                         |
| 2018, A New Bioeconomy Strategy for Sustainable Europe                                                                | The European Commission presented an action plan to develop a sustainable and circular bioeconomy to serve society, the environment and Europe's economy.                                                                                                                                                         |

*Source: own elaboration (2021).*

The above-mentioned milestones may be divided into the following periods<sup>13</sup>: the development stage until the late 1970s, stagnation from 1980 to 1986, and the decline period from 1987 to 1995. However, this approach needs to be revised in the light of recent developments. Since 2000, there have been a number of major events in which the Sustainable Development Goals (SDGs) have been formulated (the UN Summit in New York). The 17 SDGs set out by the 2030 Agenda have slowly followed in the implementation process of the Millennium Development Goals (MDGs), which consisted of 8 rather ambitious development goals<sup>14, 15</sup>. In consideration of the above, it can be summarized that still there is currently no uniform terminology or comprehensive procedure for implementing sustainability principles into individual business processes<sup>16, 17, 18, 19</sup>. According to the authors, the most frequently mentioned driving forces are circular economy<sup>20</sup>, corporate social responsibility<sup>12, 21, 22</sup>, shared economy<sup>23, 24</sup>, technological innovation<sup>25</sup>, and lean manufacturing<sup>26</sup> including all types of innovation<sup>17, 27</sup>.

To sum up, considering the theoretical background and the results of research in both the Czech organizations and abroad<sup>18, 19, 28</sup>, one of the pillars of sustainable and responsible business is currently the readiness of organizations for demographic changes, employee training, offering flexible working hours or focusing on equal opportunities and diversity. It is important to realize that the success of organizations always comes with diverse and motivated employees who are loyal and want to work for their employer, which is supported by e.g.<sup>22</sup>.

Nevertheless, the issues are still in their infancy and need to be addressed as well as the research needs to be directed at them. Based on the information above, we can identify the knowledge gap in the sense of missing comparison between sustainable business across sectors and different organizations together. The theory does not answer the question about differences in sustainable business through the bioeconomy in different organizations in the past several years. Therefore, the study will also focus on this part of the issues.

## Methodology

In connection with the main goal of the research, the key historical milestones in forming the concept of sustainable development and definitions that are in line with the mainstream concept of sustainable development are presented. By analyzing professional sources (monographs, papers, articles) in the professional databases, such as Engineering Village, Elsevier, ISI Science Direct, Scopus and Wiley, keywords and their variants are searched: sustainable business, environmental sustainability, economic sustainability, social sustainability, performance measurement, sustainable development. In preparation for the research, publications and other documents related to sustainable development are reviewed, reflecting at least 25 years of research by scientists and experts in the field.

For the bibliographic analysis, the Web of Science database (indexes: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC; all years) was searched for the topic 'bioeconomy' and a total of 2,258 records were found without time limitation. All records were processed in the VOSviewer\_1.6.16 program, and the focus was on the keywords used in the studies and the links between them (the minimum number of occurrences was 5; 142 met the threshold). The quantitative data were obtained by the primary research using a questionnaire survey in Czech organizations ( $n = 183$ ), the survey was carried out from 06/2020 to 12/2020. The sample was based on the ALBERTINA database of organizations (which contains important data of more than 2,700,000 organizations registered in the Czech Republic). The questionnaire was distributed to companies by e-mail, 850 companies were contacted twice (with a reminder), the rate of return of the questionnaire is 22%. The results can only be generalized for the research sample.

The sector where the organization operates (primary, secondary, tertiary), the size of the organization according to the number of employees, annual turnover, majority ownership (domestic, foreign), and the type of organization (private, public, non-profit) were surveyed, see Table 2.

**Table 2: Organizations that participated in the research – basic data**

| Characteristics                        | Categories   |                |             |
|----------------------------------------|--------------|----------------|-------------|
|                                        | Primary      | Secondary      | Tertiary    |
| The sector of organization's operation | 4.4%         | 41.5%          | 54.1%       |
| The size of the organization           | <50          | 51–249         | >250        |
|                                        | 26.2%        | 28.4%          | 45.4%       |
| Majority ownership                     | Domestic     | Foreign        |             |
|                                        | 45.4%        | 54.6%          |             |
| The type of organization               | Private      | Public         | Non-profit  |
|                                        | 85.8%        | 11.5%          | 2.7%        |
| Annual turnover                        | <10 mil. EUR | 11–50 mil. EUR | >50 mil EUR |
|                                        | 38.3%        | 37.7%          | 24.0%       |

Source: own survey (2021).

The data were evaluated using descriptive statistics. Then, the qualitative research was conducted, the questionnaire was designed to comply with the ethical rules and with the requirement for anonymity. The quantitative research consisted of interviews ( $n = 8$ ) and focus groups with a moderator ( $n = 6$ ). The topic of bioeconomy and its influence on sustainable business were discussed.

## Results

Table 3 summarizes the chronological overview of definitional variants characterizing the meaning of global sustainable development of the most important events and authors. The most frequently cited definition of sustainable development, which comes from the above-mentioned publication, is as follows<sup>29</sup>: "development that meets the needs of present generations without compromising the ability of future generations to meet theirs, and without doing so at the expense of other nations". However, the simplicity of this approach is misleading, according to some authors<sup>30, 31, 32, 33</sup>. Redcliff<sup>30</sup> contextualizes the different needs of diverse cultures and cultural specifics, perceiving the term even as an oxymoron<sup>33</sup>. It is clear that needs evolve over time, the definition above points to the time indefinite and positive development of global civilization. The contradictory aspect of the definition<sup>34</sup> is also reflected in the fact that it anticipates a long-term positive development for future generations, but on the other hand acknowledges that some groups may be adversely affected by certain interventions. This definition does not offer a methodology or guidance on what strategies, plans or activities need to be implemented<sup>35</sup>.

Parkin et al.<sup>36</sup> state that there are more than 200 definitions of sustainable development. Authors across the decades, such as Mebratu<sup>1</sup>, Franklin and Blyton<sup>37</sup>, Uitto<sup>38</sup>, Cobbinah et al.<sup>39</sup> and Zhang and Zhu<sup>32</sup> agree that the terminology is unclear and ambiguous, which is also evident in Table 2 below, giving the chronological overview of the definitional variants of and background to global sustainability and sustainable development.

**Table 3: The chronological overview of the definitional variants of the term 'sustainable development' and its background since the 18th century**

| Year | Author / Institution / Measure                  | Note/Definition                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1713 | Carlowitz                                       | Hans Carl von Carlowitz used the term 'nachhaltende Nutzung' (sustainable use) in his publication within the idea of sustainable forest use - only as much wood should be cut as could be recovered through planned afforestation projects <sup>40</sup> .                                   |
| 1798 | Malthus                                         | Malthus is considered the forerunner of the concept of sustainable development and the first economist to foresee the limits to growth caused by the lack of resources <sup>41</sup> , see Essay on the Principle of Population.                                                             |
| 1817 | Ricardo                                         | Ricardo set up a more complex economic model, the essence of which is that economic growth has been deteriorating in the long run due to the scarcity of natural resources. He stated that the physical limitation of a given resource will affect its price in the long run <sup>41</sup> . |
| 1978 | Organization of American States (OAS)           | The OAS has identified specific sub-areas (economic, social and the dimension of natural resources) within its infrastructure development projects focused on watercourse management.                                                                                                        |
| 1980 | World Conservation Strategy (WCS) <sup>42</sup> | The main objectives of this strategy include: the maintenance of the most important ecological processes, the observance of genetic information of all species, and the sustainable use of all populations and ecosystems.                                                                   |
| 1987 | Brundtland et al. <sup>29</sup>                 | Sustainable development is such a development that meets the needs of present generations without compromising the ability to meet the needs of future generations.                                                                                                                          |
| 1988 | Tisdell <sup>43</sup>                           | Sustainable development is the conservation of genetic diversity and the sustainable use of species and ecosystems.                                                                                                                                                                          |
| 1990 | Harwood <sup>44</sup>                           | Sustainable development is an unrestricted development system, where development focuses on achieving greater benefits for humans and the more efficient use of resources in balance with the environment required for all humans and other species.                                         |
| 1992 | Dovers and Handmer <sup>45</sup>                | The process and mechanism to achieve the intended sustainable development or the process of planned change and improvement.                                                                                                                                                                  |
| 1994 | Elkington <sup>8</sup>                          | Triple bottom line is a balance among three pillars: environmental, economic, and social.                                                                                                                                                                                                    |
| 1995 | Holdren et al. <sup>46</sup>                    | Sustainable development requires a process with a precondition that can be maintained indefinitely without a gradual reduction of valuable qualities inside or outside the system in which the process operates.                                                                             |
| 1998 | Meadows <sup>47</sup>                           | Sustainable development is a social construct derived from the long-term development of an extraordinarily complex system - the human population and economic development integrated into the ecosystems and biochemical processes of the Earth.                                             |
| 1999 | Elkington and Rowlands <sup>48</sup>            | Sustainable development encompasses the simultaneous pursuit of economic prosperity, environmental quality, and social justice.                                                                                                                                                              |
| 2002 | Dyllick and Hockerts <sup>49</sup>              | Meeting the needs of direct and indirect stakeholders (such as shareholders, employees, clients, pressure groups, and communities) without compromising the ability to meet the needs of future stakeholders.                                                                                |
| 2005 | Martin et al. <sup>50</sup>                     | <i>Capacity to continue into the long-lasting future.</i>                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2007 | Dean and McMullen <sup>51</sup>                 | <i>Sustainable development is the process of discovering, evaluating, and exploiting economic opportunities that are present when market failures reduce sustainability, including those that are relevant to the environment.</i>                                                           |
| 2008 | Lozano <sup>5</sup>                             | Sustainable development means exploiting holistic, continuous, and interlinked phenomena between economic, environmental, and social aspects. Every decision has implications for all aspects today and in the future.                                                                       |
| 2010 | Mitchell and Maxwell <sup>52</sup>              | Climate compatible development.                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 2014 | Griggs et al. <sup>53</sup>                     | Development that meets the needs of the present while maintaining the life support system on the Earth on which the well-being of present and future generations depends.                                                                                                                    |
| 2017 | Holden et al. <sup>54</sup>                     | Sustainable development is the limitation of human behaviour, including the limitation of economic activity.                                                                                                                                                                                 |
| 2020 | Zhang and Zhu <sup>32</sup>                     | Achieving higher and more evenly distributed levels of welfare within ecological limits.                                                                                                                                                                                                     |
| 2021 | Hummels and Argyrou <sup>33</sup>               | Sustainable development can best be seen as development that meets the needs of the present, corresponds to planetary boundaries, and does not jeopardize the ability of future generations to meet their own needs without crossing the same planetary boundaries.                          |

Source: own elaboration based on the sources listed in the table (2021).

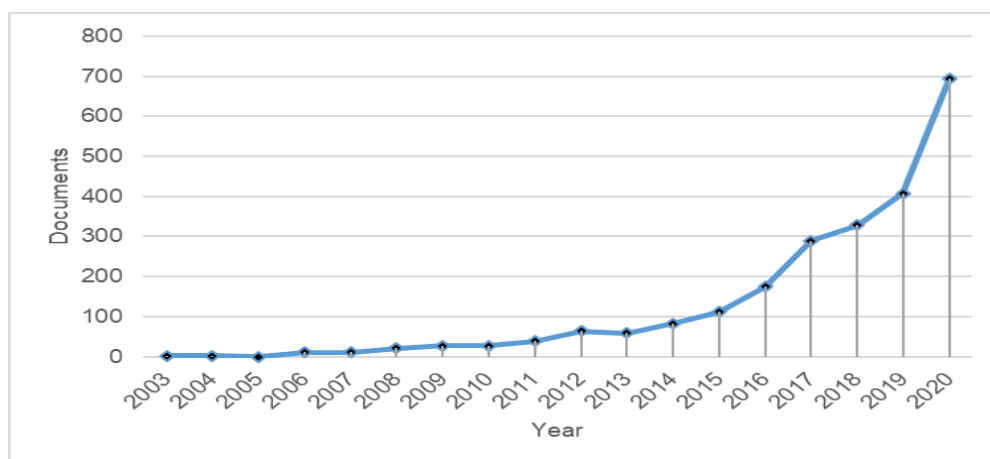
Since the ground-breaking work of Brundtland et al.<sup>29</sup>, the term 'sustainable development' has been used in different ways depending on whether it has been formulated in an academic context or in an organizational, business, or environmental policy. The Brundtland Report develops the concept of needs, especially basic needs, which should be given the highest priority (see SDGs). Of course, a situation in which people are unable to provide for their basic human needs does not allow for addressing the protection of certain environmental components. As can be seen from Table 2, the definitions are inconsistent. Closely connected to sustainable development is the multidisciplinary field called bioeconomy, which has relatively short historical development<sup>55</sup> and represents one of the main paths to sustainable development. The links to food securing, depleting natural resources, and polluting the environment, including the climate change, are the main reasons for the emergence of this multidisciplinary approach.

According to Lovrić et al.<sup>56</sup>, the origins of bioeconomy can be traced back to the White Paper – Growth, Competitiveness and Employment – Challenges and Ways Forward into the 21st Century of 1993, which emphasizes knowledge-based investment and the greater role of biotechnology in innovation. The authors also mention the Lisbon Strategy adopted in 2000, which highlights and calls for a competitive knowledge-based economy capable of sustainable economic growth while creating more jobs. The year of 2005 gave rise to the new concept of knowledge-based bioeconomy<sup>57, 58</sup>, whose key players are European technology platforms, which can include industry forums that create short-term as well as long-term agendas in research and innovation at both national and European levels. Finland was one of the first countries to develop its own bioeconomy strategy in 2014<sup>58</sup>, which can be seen as a new pathway to the sustainable green economy with the support for growth and innovation while conserving natural resources. Von Braun<sup>59</sup> emphasizes the sharing of new bioeconomic knowledge of rich countries with developing countries and promoting the adaptation to local conditions, which is a current global challenge and collective action. At present, according to Lovrić et al.<sup>56</sup>, industry is the predominant powerhouse of EU research and innovation priorities, which are dedicated to capital-intensive systems and higher levels of global value chains.

Bioeconomy<sup>56, 60</sup> is based on agriculture, forestry, aquaculture, food industry, energy, chemical industry, and biotechnology industries including pharmaceuticals. This is a new progressive interdisciplinary research area and the interdisciplinarity of the field is clearly visible. The scientific contribution to solving these problems therefore necessarily requires a multifaceted and integrated approach or interdisciplinary research<sup>61</sup>. Bioeconomy can be defined as an economy where the basic building blocks for materials, chemicals and energy come from renewable biological resources<sup>62</sup>. At the same time, the bioeconomy is a social economy, i.e., a service to society, humanity, and thus to the entire planet, responsibly performed to improve the quality of life.

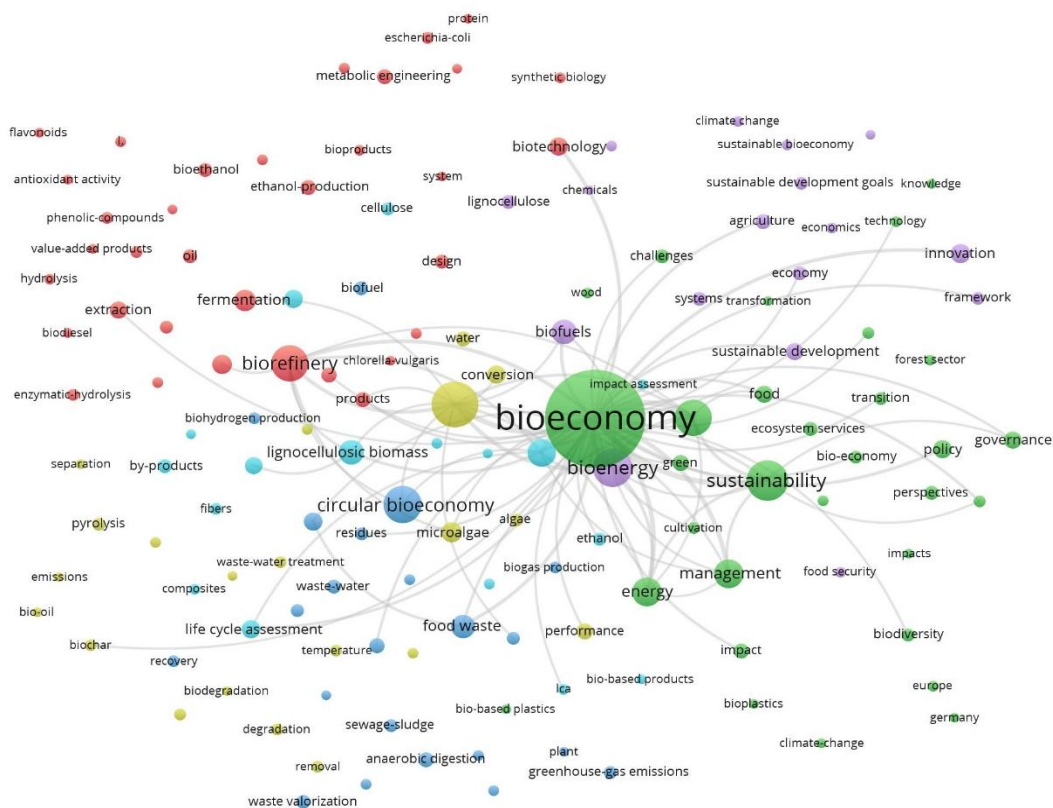
The bioeconomy assumes a close connection to sustainable development<sup>63, 64</sup>. Not only the evolution of the global population, but also the continuous changes in the environment, climate and ecosystems and their negative impacts highlight the need to address the issues of bioeconomy in a broad context, namely by using knowledge-based and innovation approach. The concept of knowledge-based economy reflects the vision of achieving economic growth through high-tech industries, which requires investment in innovation and highly skilled workforce. An interesting paradox is that the concept of bioeconomy has become prominent in politics, science, and research, yet Western countries use the concept of bioeconomy for promoting research and innovation processes to create better economic development and growth based on biological foundations<sup>60</sup>. Bioeconomic disciplines deal with complex social problems and challenges, in which environmental, economic, and social dimensions are dynamically interconnected in both conflicting and mutually improving behaviour, which is referred to as 'wicked problems'<sup>65</sup>.

Strategies in bioeconomy are often contradictory<sup>66</sup>, leading to diverse views on the measures needed to realise its potential. This can be linked to the fact that bioeconomy integrates a number of sectors<sup>60</sup> with completely different perceptions from the society's perspective. The European Bioeconomy Strategy was developed in 2018 following the update of the original Bioeconomy Strategy<sup>67</sup>, which was a necessary step to accelerate the implementation of sustainable European bioeconomy to maximise the contribution to the 2030 Agenda and its sustainable development goals (SDGs) as well as the Paris Agreement. The Czech Republic does not have a separate conceptual document on bioeconomy yet, but the ideas and principles of this multidisciplinary field are emphasized in a number of national strategies, especially in the Strategy of the Ministry of Agriculture with a view to 2030<sup>68</sup>. What is characteristic of the concept is that it involves a massive transformation of current production and consumption systems. The rise in bioeconomy as a global concept is reflected not only in the growing number of countries that have strategies and policies related to bioeconomy and bioeconomics, but also in the scientific literature, as illustrated in Figure 1, which shows the number of records that have the term 'bioeconomy' in their titles, summaries, or keywords.



**Figure 1: The number of publications related to bioeconomy listed in the Scopus database**  
Source: Scopus<sup>69</sup>, own processing (2021).

It is clear from Figure 1 that this multidisciplinary field is increasingly being referred to in the empirical research, as evidenced by Lovrić et al.<sup>56</sup>. A total of 2,258 entries with bioeconomy have been found in the bibliographic analysis.



**Figure 2: The bibliographic analysis in WoS – Bioeconomy and the most important keywords**  
Source: own processing in VOSviewer\_1.6.16 program (2021).

As shown in Figure 2, the research in bioeconomy is strongly focused on sustainability, sustainable development, circular economy, management, energy, bioenergy, biorefinery, biofuels, and last but not least the food industry. As far as the future till 2050 is concerned, Sarkar et al.<sup>70</sup> identify several major challenges in the context of bioeconomy, which will require transformation and innovative processes that are interconnected with the environment, the health of individuals, sustainable production and consumer demands driven by the projected growth in the world's population.

Based on the results of the primary research in the selected organizations in the Czech Republic, it can be summarized that the majority of the surveyed organizations are engaged in sustainable business (41%), but the focus group showed that the main reason is the pressure of the external environment, both global and national. Table 4 shows the attitudes of the surveyed organizations with regard to their focus on the 3 pillars of sustainable business.

**Table 4: The pivot table (%) of organizations focusing on the three-pillar system by the annual turnover**

| Organization's focus                                       | Annual turnover |                |              | Total |
|------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|--------------|-------|
|                                                            | <10 mil. EUR    | 11–50 mil. EUR | >50 mil. EUR |       |
| Organization's focus – economic and environmental          | 3%              | 4%             | 2%           | 9%    |
| Organization's focus – economic and social                 | 10%             | 10%            | 7%           | 27%   |
| Organization's focus – economic                            | 10%             | 9%             | 4%           | 23%   |
| Organization's focus – economic, environmental, and social | 15%             | 15%            | 11%          | 41%   |
| Total                                                      | 38%             | 38%            | 24%          | 100%  |

Source: own processing (2021).

The results show that 41% of organizations implement projects aimed at environmental protection, projects beneficial to employees, local locations, or as the case may be to other important stakeholders, together with the pursuit of economic objectives. Last but not least, the dependence of selected variables on the identification features of the organization (size by the number of employees and annual turnover) is examined, see Table 5.

**Table 5: The organization's orientation in accordance with the selected principles of sustainable business – testing of dependencies between the selected qualitative variables**

| Variable                                  | Annual turnover<br><i>p</i> -value/<br>Cramer's V | Size<br><i>p</i> -value/<br>Cramer's V |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Results                                   | 0.260/-                                           | 0.114/-                                |
| Customer                                  | 0.609/-                                           | 0.647/-                                |
| The product quality                       | 0.172/-                                           | 0.354/-                                |
| Innovation (adaptability and flexibility) | 0.268/-                                           | 0.042/0.183                            |
| In-house processes                        | 0.040/0.185                                       | 0.002/0.255                            |
| Increase in profit                        | 0.587/-                                           | 0.910/-                                |

Source: own processing (2021).

The null hypothesis about the independence of the organization's size (*p*-value 0.04) and the annual turnover (*p*-value 0.002) and the fact that the organization is process-oriented is rejected. Furthermore, the null hypothesis about the independence of the organization's size (*p*-value 0.04) and the focus on innovation in the context of responsiveness and adaptability is rejected. The majority of the interviewed company representatives have agreed that sustainability is necessary mainly in supply chains, innovations, and digitization, including the increase in labour productivity. Such an approach helps good external presentation to final consumers and contributes to better financial results.

## Discussion

The survey and research conducted, in the context of objectives, confirm the lack of uniformity in the understanding of the concepts and the diversity of definitions in the field of sustainability and bioeconomy<sup>2,3</sup>. Historically, it can be stated that although these terms are widely used by organizations, they do not always lead to an accurate understanding of the meaning. Biely et al.<sup>71</sup> mention sustainable development as a need for permanence in terms of understanding society, but the evolving society over time does not allow for the unambiguous permanence of defining, as is the case, for example, with physical units and the like. For this reason, developmental changes in sustainable development can be viewed as changes that copy, among other things, changes in the society's view of the issues, and the milestones listed in Table 1 are proof of this.

Sustainable development, as a separate term, is understood differently, depending on the area in which the company deploys it. In practice, together with the changing understanding of the primary purpose of an organization, it is closely linked to the economic power of the organization. The overriding need for economic saturation or return on investment or other non-monetary benefits in the understanding and implementation of all measures and rules associated with sustainable development then becomes an unwritten rule, just as can be found in Schaltegger, Wagner<sup>72</sup>. Subsequent value chains are already so extensive that they force the organization to diversify and have a multidisciplinary understanding of all activities<sup>73, 74</sup>. The logical result is then the necessity to have procedures and standards elaborated and to have defined areas of sustainability integrated into the normative understanding with a declaratory overlap, which are often not fully implemented in a procedural way<sup>19</sup>.

From the primary research conducted in the selected Czech organizations, it is clear that a large number of organizations are already engaged in sustainable business in the sense of directing their projects at other non-economic benefits, especially in the environmental and social direction. However, it is also evident that in such cases, in addition to the pressure of the environment on the associated effects, the size of the organization, the organization chart and incentives from the public space play an important role. It can be agreed<sup>5</sup> that these links give a good subject for further research in the future to reveal the interactions and influence of individual process components on the effectiveness of sustainable development and bioeconomy.

## Conclusion

At present, there is insufficient theoretical and practical knowledge to exploit the potential of bioeconomy based on the principles of sustainable development, and it is therefore necessary to focus more resources on research and development, innovation, new technologies and practices meeting the priority objectives of bioeconomy and circular economy. The agricultural and forest bioeconomy is a global trend, with approximately 50 countries implementing bioeconomy strategies over the past decade<sup>59</sup>, including high and middle-income countries. At present, the Czech Republic does not have strategies set sufficiently to reflect the desired direction of bioeconomy, and therefore it is necessary to take fundamental measures to support the development of this multidisciplinary field, and thus to gain a competitive advantage and other social, economic, and environmental benefits as soon as possible.

## References

1. Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. *Environmental impact assessment review*, 18(6), 493 – 520. DOI: 10.1016/S0195-9255(98)00019-5.
2. Jabareen, Y. (2004). A knowledge map for describing variegated and conflict domains of sustainable development. *Journal of Environmental Planning and Management*, 47(4), 623 – 642. DOI: 10.1080/0964056042000243267.
3. Jabareen, Y. (2008). A new conceptual framework for sustainable development. *Environment, development and sustainability*, 10(2), 179 – 192. DOI: 10.1007/s10668-006-9058-z.
4. Neuwirth, R. J. (2017). Global Law and Sustainable Development: Change and the “Developing–Developed Country” Terminology. *The European Journal of Development Research*, 29(4), 911 – 925. DOI: 10.1057/s41287-016-0067-y.
5. Lozano, R. (2008). Envisioning sustainability three-dimensionally. *Journal of cleaner production*, 16(17), 1838–1846. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.02.008.
6. Prugh, T., & Assadourian, E. (2003). What is sustainability, anyway?. *World Watch*, 16(5), 10 – 10. DOI: 10.4324/9781351275927-3.
7. Sartori, S., Latrónico, F., & Campos, L. M. (2014). Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature. *Ambiente & Sociedade*, 17(1). DOI: 10.1590/1809-44220003490.

8. Elkington, J. (1994). Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California management review*, 36(2), 90 – 100. DOI: 10.2307/41165746.
9. Elkington, J. (1998). Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. *Environmental quality management*, 8(1), 37 – 51. DOI: 10.1002/tqem.3310080106.
10. Norman, W., & MacDonald, C. (2004). Getting to the bottom of "triple bottom line". *Business ethics quarterly*, 243 – 262. DOI: 10.5840/beq200414211.
11. Slaper, T. F., & Hall, T. J. (2011). The triple bottom line: What is it and how does it work. *Indiana business review*, 86(1), 4 – 8.
12. Klarin, T. (2018). The concept of sustainable development: From its beginning to the contemporary issues. *Zagreb International Review of Economics and Business*, 21(1), 67 – 94. DOI: 10.2478/zireb-2018-0005.
13. Waas, T., Hugé, J., Verbruggen, A., & Wright, T. (2011). Sustainable development: A bird's eye view. *Sustainability*, 3(10), 1637 – 1661. DOI: 10.3390/su3101637.
14. Vandemoortele, J. (2011). The MDG story: intention denied. *Development and change*, 42(1), 1 – 21. DOI: 10.1111/j.1467-7660.2010.01678.x.
15. Fukuda-Parr, S., Greenstein, J., & Stewart, D. (2013). How should MDG success and failure be judged: Faster progress or achieving the targets?. *World Development*, 41, 19 – 30. DOI: 10.1016/j.worlddev.2012.06.014.
16. Todeschini, B. V., Cortimiglia, M. N., Callegaro-de-Menezes, D., & Ghezzi, A. (2017). Innovative and sustainable business models in the fashion industry: Entrepreneurial drivers, opportunities, and challenges. *Business Horizons*, 60(6), 759–770. DOI: 10.1016/j.bushor.2017.07.003.
17. Stacho, Z., Stachová, K., & Cagáňová, D. (2020). Participation of all Employee Categories in Innovation Processes in Slovak Organisations. *Mobile Networks and Applications*, 25(3), 853 – 859. DOI: 10.1007/s11036-020-01518-2.
18. Urbanová, H., & Vrabcová, P. (2020). Factors influencing the setting of educational processes in the context of age management and CSR. *Economics & Sociology*, 13(3), 218 – 229. DOI: 10.14254/2071-789X.2020/13-3/13.
19. Tassinari, G., Drabik, D., Boccaletti, S., & Soregaroli, C. (2021). Case studies research in the bioeconomy: A systematic literature review. *Agricultural Economics*.
20. Nosratabadi, S., Mosavi, A., Shamshirband, S., Kazimieras Zavadskas, E., Rakotonirainy, A., & Chau, K. W. (2019). Sustainable business models: A review. *Sustainability*, 11(6), 1663. DOI: 10.3390/su11061663.
21. Ciccullo, F., Pero, M., Caridi, M., Gosling, J., & Purvis, L. (2018). Integrating the environmental and social sustainability pillars into the lean and agile supply chain management paradigms: A literature review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2336 – 2350. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.176.
22. Hitka, M., Lorincová, S., Potkány, M., Balážová, Ž., & Caha, Z. (2021). Differentiated approach to employee motivation in terms of finance. *Journal of Business Economics and Management*, 22(1), 118 – 134. DOI: 10.3846/jbem.2020.13702.
23. Geissinger, A., Laurell, C., Öberg, C., & Sandström, C. (2019). How sustainable is the sharing economy? On the sustainability connotations of sharing economy platforms. *Journal of Cleaner Production*, 206, 419 – 429. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.196.
24. Leung, X. Y., Xue, L., & Wen, H. (2019). Framing the sharing economy: Toward a sustainable ecosystem. *Tourism Management*, 71, 44 – 53. DOI: 10.1016/j.tourman.2018.09.021.
25. Liu, S. Y., Yen, C. Y., Tsai, K. N., & Lo, W. S. (2017). A conceptual framework for agri-food tourism as an eco-innovation strategy in small farms. *Sustainability*, 9(10), 1683. DOI: 10.3390/su9101683.
26. Wichaisri, S., & Sopadang, A. (2018). Trends and future directions in sustainable development. *Sustainable Development*, 26(1), 1 – 17. DOI: 10.1002/sd.1687.
27. Geissdoerfer, M., Vladimirova, D., & Evans, S. (2018). Sustainable business model innovation: A review. *Journal of cleaner production*, 198, 401 – 416. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.240.

28. Hung, S. W., Li, C. M., & Lee, J. M. (2019). Firm growth, business risk, and corporate social responsibility in Taiwan's food industry. *Agricultural Economics*, 65(8), 366 – 374. DOI: 10.17221/339/2018-AGRICECON.
29. Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S., & Chidzero, B. J. N. Y. (1987). *Our common future*. New York, 8.
30. Redclift, M. (2005). Sustainable development (1987–2005): an oxymoron comes of age. *Sustainable development*, 13(4), 212 – 227. DOI: 10.1002/sd.281.
31. Millar, N., McLaughlin, E., & Börger, T. (2019). The circular economy: swings and roundabouts?. *Ecological Economics*, 158, 11 – 19. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.12.012.
32. Zhang, S., & Zhu, D. (2020). Have countries moved towards sustainable development or not? Definition, criteria, indicators and empirical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 121929. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121929.
33. Hummels, H., & Argyrou, A. (2021). Planetary demands: Redefining sustainable development and sustainable entrepreneurship. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123804. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123804.
34. Punkari, M., Fuentes, M., White, P., Rajalahti, R., & Pehu, E. (2007). *Social and environmental sustainability of agriculture and rural development investments: a monitoring and evaluation toolkit* (No. 38710, p. 1). The World Bank.
35. Baumgartner, R. J., & Rauter, R. (2017). Strategic perspectives of corporate sustainability management to develop a sustainable organization. *Journal of Cleaner Production*, 140, 81 – 92. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.146.
36. Parkin, S., Sommer, F., & Uren, S. (2003). Sustainable development: understanding the concept and practical challenge. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* (Vol. 156, No. 1, pp. 19 – 26). Thomas Telford Ltd. DOI: 10.1680/ensu.2003.156.3.169.
37. Franklin, A., & Blyton, P. (2013). *Researching sustainability: a guide to social science methods, practice and engagement*. Routledge.
38. Uitto, J. I. (2014). Evaluating environment and development: Lessons from international cooperation. *Evaluation*, 20(1), 44 – 57. DOI: 10.1177/1356389013517443.
39. Cobbinah, P. B., Erdiaw-Kwasie, M. O., & Amoateng, P. (2015). Rethinking sustainable development within the framework of poverty and urbanisation in developing countries. *Environmental Development*, 13, 18 – 32. DOI: 10.1016/j.envdev.2014.11.001.
40. Grober, U. (1999). Hans Carl von Carlowitz: Der Erfinder der Nachhaltigkeit. *Erscheint in*, 300, 1645 – 1714.
41. Dorfman, R. (1989). Thomas Robert Malthus and David Ricardo. *Journal of economic perspectives*, 3(3), 153 – 164. DOI: 10.1257/jep.3.3.153.
42. Talbot, L. M. (1980). The world's conservation strategy. *Environmental Conservation*, 7(4), 259 – 268. DOI: 10.1017/S0376892900007955.
43. Tisdell, C. (1988). Sustainable development: differing perspectives of ecologists and economists, and relevance to LDCs. *World development*, 16(3), 373 – 384. DOI: 10.1016/0305-750X(88)90004-6.
44. Harwood, R. R. (1990). A history of sustainable agriculture. *Sustainable agricultural systems*, 3 – 19. DOI: 10.1201/9781003070474-2.
45. Dovers, S. R., & Handmer, J. W. (1992). Uncertainty, sustainability and change. *Global Environmental Change*, 2(4), 262 – 276. DOI: 10.1016/0959-3780(92)90044-8.
46. Holdren, J. P., Daily, G. C., & Ehrlich, P. R. (1995). The meaning of sustainability: biogeophysical aspects. *Defining and measuring sustainability: the biogeophysical foundations*, 3 – 17.
47. Meadows, D. H. (1998). *Indicators and information systems for sustainable development*.
48. Elkington, J., & Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42. DOI: 10.5860/choice.36-3997.
49. Dyllick, T., & Hockerts, K. (2002). Beyond the business case for corporate sustainability. *Business strategy and the environment*, 11(2), 130 – 141. DOI: 10.1002/bse.323.

50. Martin, S., Brannigan, J., & Hall, A. (2005). Sustainability, systems thinking and professional practice. *Journal of Geography in Higher Education*, 29(1), 79 – 89. DOI: 10.1007/s11213-005-4156-7.
51. Dean, T. J., & McMullen, J. S. (2007). Toward a theory of sustainable entrepreneurship: Reducing environmental degradation through entrepreneurial action. *Journal of business venturing*, 22(1), 50 – 76. DOI: 10.1016/j.jbusvent.2005.09.003.
52. Mitchell, T., & Maxwell, S. (2010). *Defining Climate Compatible Development: Climate and Development Knowledge Network Policy Brief*. London: CDKN & ODI.
53. Griggs, D., Smith, M. S., Rockström, J., Öhman, M. C., Gaffney, O., Glaser, G., ... & Shyamsundar, P. (2014). An integrated framework for sustainable development goals. *Ecology and Society*, 19(4). DOI: 10.5751/ES-07082-190449.
54. Holden, E., Linnerud, K., & Banister, D. (2017). The imperatives of sustainable development. *Sustainable Development*, 25(3), 213 – 226. DOI: 10.1002/sd.1647.
55. Bugge, M. M., Hansen, T., & Klitkou, A. (2016). What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability*, 8(7), 691. DOI: 10.3390/su8070691.
56. Lovrić, M., Lovrić, N., & Mavsar, R. (2020). Mapping forest-based bioeconomy research in Europe. *Forest Policy and Economics*, 110, 101874. DOI: 10.1016/j.forpol.2019.01.019.
57. EC (2005). *New perspectives on the knowledge-based bio-economy*.
58. Mustalahti, I. (2018). The responsive bioeconomy: The need for inclusion of citizens and environmental capability in the forest based bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3781 – 3790. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.132.
59. von Braun, J. (2018). Bioeconomy—the global trend and its implications for sustainability and food security. *Global food security*, 19, 81 – 83. DOI: 10.1016/j.gfs.2018.10.003.
60. Staffas, L., Gustavsson, M., & McCormick, K. (2013). Strategies and policies for the bioeconomy and bio-based economy: An analysis of official national approaches. *Sustainability*, 5(6), 2751 – 2769. DOI: 10.3390/su5062751.
61. Hadorn, G. H., Hoffmann-Riem, H., Biber-Klemm, S., Grossenbacher-Mansuy, W., Joye, D., Pohl, C., ... & Zemp, E. (Eds.). (2008). *Handbook of transdisciplinary research* (Vol. 10, pp. 978 – 1). Dordrecht: Springer.
62. McCormick, K., & Kautto, N. (2013). The bioeconomy in Europe: An overview. *Sustainability*, 5(6), 2589 – 2608. DOI: 10.3390/su5062589.
63. Liobikiene, G., Balezentis, T., Streimikiene, D., & Chen, X. (2019). Evaluation of bioeconomy in the context of strong sustainability. *Sustainable development*, 27(5), 955 – 964. DOI: 10.1002/sd.1984.
64. Wohlfahrt, J., Ferchaud, F., Gabrielle, B., Godard, C., Kurek, B., Loyce, C., & Therond, O. (2019). Characteristics of bioeconomy systems and sustainability issues at the territorial scale. A review. *Journal of Cleaner Production*, 232, 898 – 909. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.385.
65. Batie, S. (2008). Wicked problems and applied economics. *American Journal of Agricultural Economics*, 90(5), 1176. DOI: 10.1111/j.1467-8276.2008.01202.x.
66. Bennich, T., & Belyazid, S. (2017). The route to sustainability—Prospects and challenges of the bio-based economy. *Sustainability*, 9(6), 887. DOI: 10.3390/su9060887.
67. Robert, N., Giuntoli, J., Araujo, R., Avraamides, M., Balzi, E., Barredo, J. I., ... & Mubareka, S. (2020). Development of a bioeconomy monitoring framework for the European Union: An integrative and collaborative approach. *New Biotechnology*, 59, 10 – 19. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.06.001.
68. eAgri (2016). *Strategie resortu Ministerstva zemědělství České republiky s výhledem do roku 2030*. Ministerstvo zemědělství. [online]. Available at: [http://eagri.cz/public/web/file/538509/Strategie\\_MZe\\_final\\_s\\_grafikou.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/538509/Strategie_MZe_final_s_grafikou.pdf).
69. Scopus (2021). Analyze search results. [online]. Available at: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=5a81c5f4ec32ae49ca712bda670e48d4&origin=result&list&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Bioeconomy%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=25&count=2551&analyzeResults=Analyze+results&txGid=4185c7082b480b540de08034e79d7008>.

70. Sarkar, S. F., Poon, J. S., Lepage, E., Bilecki, L., & Girard, B. (2018). Enabling a sustainable and prosperous future through science and innovation in the bioeconomy at Agriculture and Agri-Food Canada. *New biotechnology*, 40, 70 – 75. DOI: 10.1016/j.nbt.2017.04.001.
71. Biely, K., Maes, D., & Van Passel, S. (2018). The idea of weak sustainability is illegitimate. *Environment, Development and Sustainability*, 20(1), 223 – 232. DOI: 10.1007/s10668-016-9878-4.
72. Schaltegger, S., & Wagner, M. (2011). Sustainable entrepreneurship and sustainability innovation: categories and interactions. *Business strategy and the environment*, 20(4), 222 – 237. DOI: 10.1002/bse.682.
73. Potkany, M., Stasiak-Betlejewska, R., Kovac, R., & Gejdos, M. (2016). Outsourcing in contidions of SMEs: the potential for cost savings. *Polish Journal of Management Studies*, 13. DOI: 10.17512/pjms.2016.13.1.14.
74. Hitka, M., Rózsa, Z., Potkány, M., & Ližbetinová, L. (2019). Factors forming employee motivation influenced by regional and age-related differences. *Journal of Business Economics and Management*, 20(4), 674 – 693. DOI: 10.3846/jbem.2019.6586.

## Bioekonomika v kontextu rozvoje globální koncepce udržitelnosti

**Pavla VRABCOVÁ<sup>a</sup>, Hana URBANCOVÁ<sup>b</sup>, Martin ŘEHOŘ<sup>c</sup>, Dominika KADEŘÁBKOVÁ<sup>d</sup>**

Vysoká škola ekonomie a managementu, a.s., Nárožní 2600/9a, 158 00 Praha 5, Česká republika,

<sup>a</sup> Katedra managementu, korespondenční autor, e-mail: pavla.vrabcova@vsem.cz

<sup>b</sup> Katedra lidských zdrojů, e-mail: hana.urancova@vsem.cz

<sup>c</sup> Katedra managementu, e-mail: martin.rehor@vsem.cz

<sup>d</sup> Katedra lidských zdrojů, e-mail: dominika.kaderabkova@vsem.cz

### Souhrn

Primárním tématem udržitelnosti rozvoje je vztah člověka a přírody, resp. lidských sídel a krajiny. Vzhledem k naléhavým potřebám lze očekávat, že věda o udržitelnosti a bioekonomice, jež je multidisciplinárním oborem, bude hrát důležitou roli při získávání odborných znalostí a přispívat k realizaci udržitelné společnosti. Udržitelný rozvoj spolu s bioekonomikou jsou součástí poslání mezinárodních, národních, nadnárodních organizací a institucí, měst i městských částí a v neposlední řadě nevládních organizací.

Hlavním cílem je prezentovat ucelený přehled definic, které byly v globálním kontextu udržitelnosti předkládány, identifikovat základní vývojové milníky při definování tohoto fenoménu a vyhodnotit vazby s bioekonomikou. Dílčím cílem je identifikovat přístupy vybraných českých organizací k udržitelnému podnikání. Je provedena literární rešerše zdrojů spolu s bibliografickou analýzou mezinárodně využívaného termínu bioeconomy. Primární data byla získána na základě kvantitativního výzkumu formou dotazníkového šetření (n = 183) a kvalitativního výzkumu pomocí focus group a individuálních rozhovorů (n = 8). Obsahová analýza odhalila terminologický nesoulad a potřebu formulování strategie bioekonomiky na úrovni ČR.

**Klíčová slova:** udržitelnost, triple bottom line, koncept rozvoje, bibliografická analýza, podnik, strategie bioekonomiky.

## Ecotoxicological effects of the leachate from the waste tires on the environment

**Helena HYBSKÁ, Dagmar SAMEŠOVÁ, Martina LOBOTKOVÁ**

Technical University in Zvolen, Faculty of Ecology and Environmental Sciences,  
Department of Environmental engineering, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen,  
Slovakia

e-mail: hybska@tuzvo.sk, samesova@tuzvo.sk, xlobotkova@tuzvo.sk

### Summary

Ecotoxicity is one of the several hazardous properties of waste and presents an acute or delayed danger due to the adverse impact on the environment by its toxic effects on the biotic systems. One of the most important sectors in the waste management are discarded waste tires. The amount of them is arising every year due to the development of automotive industry. The case study is focused on the evaluation of the ecotoxicological impact of waste tires on the environment by using bioassays. Waste tires have been fixed according to the establishment to crushed and ground by sample from which the aqueous extracts have been made. For ecotoxicological testing we used three aquatic tests, namely the test of acute toxicity on *Daphnia magna*, the growth inhibition test on *Lemna minor* and on *Scenedesmus subspicatus* and one terrestrial test with *Sinapis alba*. Based on the results of the individual preliminary tests have been made the basic tests and the determined value  $EC_{50}$  and  $IC_{50}$ . The most important toxicity has been shown particularly in an aqueous extract from the ground by sample and the most sensitive testing organism which exhibited the highest toxicity has been *Daphnia magna*. Results of the terrestrial test was negative. It has been found that the preparation of the sample - particle size - has a significant effect on the ecotoxicity. It follows that worn tires pose an environmental risk to the aquatic environment.

**Keywords:** waste tires, aqueous extract, ecotoxicity, tests of toxicity, environmental risk, aquatic environment

### Introduction

The anthropogenic activity originates a lot of the waste, which have negative effects on the environment. The development of the automotive industry closely related with problems of the production of the waste tires. The tires are used in the transport from air to the road. The tires after use are represent as a hardly biodegradable waste<sup>1</sup>. Their accumulation is a global environmental problem and amount is estimated at 1.5 billion annually<sup>2</sup>. Therefore, it is very important to operate with them so that there is no environmental risk. Waste tires are classified in the waste catalog as "other wastes"<sup>3</sup>. They enter the environment during their production already (solid pollutants produced by mixing, homogenization and tire vulcanization; volatile organic compounds; odour in the form hydrogen sulphide). These pollutants degrade air quality. Other environmental risk is mainly related to landfilling of the waste. The tires disturb the stability of the landfill, increase the risk of the fire with release of toxic gases. They are a risk of the toxic leakage and are very hardly biodegradable<sup>4,5</sup>. The studies confirm increased values of the heavy metals such as Cd, Cr, Se, Pb, Zn and Ba in a seepage, especially in acidic environment. The risks of the waste incineration of the tires closely related to the release carbon monoxide and polyaromatic hydrocarbons<sup>6</sup>. An important part of the environmental impact assessment is the determination of the toxic effects of the waste tires using ecotoxicological tests. The tires contain various water-soluble compounds, which can leach into the water and have toxic effects on aquatic organisms. Wik and Dave<sup>7</sup> tested the toxic effect at 12 randomly selected waste tires on *Daphnia magna* in an aqueous extract. The determined value  $EC_{50}$  (after 48 hours) was in the range 0.25 – 16 g/l. In the study confirmed clear photo activation with an increase in toxicity > 10 times in four cases by the exposure of the test organisms to UV radiation for 2 hours. According to study, Wik and Dave<sup>8</sup>

investigated the toxicity of the abrasive rubber from tires, which they leached into water at 44 °C. They found the toxic effect of the waste tires on *Daphnia magna*, which is caused mainly by non-polar organic compounds. Sediments from the road are likely reservoir of the tire particles in the environment<sup>9</sup>. It was observed the effect of the temperature on the leachability of the toxicants from the sediment. The eluates obtained at the higher temperatures were toxic. In the eluates was confirmed the presence of the mainly zinc and aniline. These are potentially toxic substances with the effect on the organisms *Daphnia magna* and *Pseudokirchneriella subspicata*. The results of the study by Panko et al.<sup>10</sup> pointed to the toxic effect of a mixture of the particles formed from a complex mixture of the rubber from a tire and from roadway (sediment), which represented acute toxicity to aquatic test organisms (green algae and daphnia) at concentration up to 10 000 mg/kg. Wik et al.<sup>11</sup> in an experiment abraded rubber from three different tires and leached them in deionized water, six times in succession. Leach toxicity was tested using standardized tests of the toxicity with *Pseudokirchneriella subcapitata* (72-hour growth inhibition), *Daphnia magna* (24 and 48-hour immobility) and *Ceriodaphnia dubia* (48-hours survival and 9 days reproduction and survival) and *Danio rerio* (48-hours lethality). *Ceriodaphnia dubia* was the most sensitive end organism tested ( $EC_{50} = 0.013$  g/l) until the third leaching of the most toxic tire, which is similar to the expected concentration in the outflows from the road. The evaluation of the toxicity identification indicated that toxicity was caused by zinc and organic compounds<sup>11</sup>. Khan et al.<sup>12</sup> found that the exposure to aqueous extract from waste tires causes short-term and long-term toxicity to the freshwater organism *Hyallela azteca*. The chemical content of the freshwater and marine extracts obtained from waste tires has confirmed adverse effects on the microalgae *Raphidocelis subspicata* (freshwater) and *Skeletonema costatum* (marine). Chemical analysis confirmed the presence of the organic and metallic compounds in the extracts that inhibited algal growth. The extracts were mild to highly toxic to algae depending on increasing the contamination by organic and inorganic additives. It confirms the necessity for a better understanding of the impact of the plastics-containing chemicals on the aquatic ecosystems<sup>13</sup>. The authors<sup>14</sup> simulated natural conditions and placed a package of the tires in water for 120 days. By analyzing the aqueous extract at specified time intervals, they found changes in the physicochemical parameters of the samples and the presence of the undesirable substances. There are several studies, which are focused on the methods of the recovery of the waste tires. Methods include, for example, the use of the tire pulp in cement brash and asphalt brash. The study<sup>15</sup> presents experience with suitable technologies for the recovery of the waste tires in the construction, but they point out on the toxicity of the used waste products contained in waste tires. They recommend more complex studies to determine the toxic effects of the building materials containing waste tires by testing their leachates at different acidities of the aqueous extract. The study<sup>16</sup> about the microplastic distribution in Charleston Harbor, SC, USA have revealed that a large proportion of the microplastic particles present in the tidal sediments are particles from waste tires. These particles come from the wear of the tires on the roads and are washed into the estuaries during the rains. An autopsy of the fish confirmed that the particles had been absorbed and accumulated in their intestinal tract.

The aim of this case study was to determine the ecotoxicity of the waste tires depending on the particle size of the samples using appropriate ecotoxicological bioassays. Based on the obtained results, it is possible to estimate the adverse effects of the waste tires on the aquatic environment.

## Experimental part

The waste tires used for the testing were treated by grinding. Subsequently, the aqueous extracts were prepared from them. We determined physicochemical parameters - pH, specific conductivity and COD. The ecotoxicological properties of the extracts were determined by bioassays: Acute toxicity test on *Daphnia magna*, Growth inhibition (stimulation) test of common duckweed (*Lemna minor*) and Growth inhibition test of green algae. At the same time, we also used one terrestrial test, using the seeds of *Sinapis alba*.

## The sample preparation

The tire was processed with a retreading device into smaller pieces to achieve the desired fraction. The rest of the tire was cut using an industrial shear mill. The metal cords, as part of the tire, were separated using a magnet. The laboratory samples were ground with a ball mill RETSCH MM 301. One group of the samples was ground under normal laboratory conditions to a particle size  $> 3$  mm. The samples of the tire were cryogenically processed by to achieve a final particle size of 1 mm (by freezing at  $-200$  °C using liquid nitrogen). In this way, a size  $< 1$  mm was achieved.

## Preparation of the aqueous extract

The aqueous extracts were prepared from 100 g of the dry matter in 1 liter of the demineralized water by shaking for 6 hours at 175 rpm. The dry matter was determined by drying the sample to constant weight at  $105$  °C in a laboratory oven. The solid part was separated from the liquid part by centrifugation (MEDITRONIC BL-S) at 4000 rpm for 20 min. The separation by filtration was used as needed. The preparation of the aqueous extracts was performed under normal laboratory conditions. The procedure is based on STN 83 8303.<sup>26</sup>

## Determination of physicochemical parameters

pH: device WTW Ino Lab pH Level 3, with combined electrode SenTix 81®, by STN EN ISO 10523.<sup>17</sup>

Specific conductivity: conductivity meter WTW LF 318, by STN EN 27888.<sup>19</sup>

COD: by STN ISO 15705.<sup>22</sup>

## Ecotoxicological tests

In the case study, ecotoxicological tests (presented in Table 1 – 4) were used.

**Table 1: Test conditions for *Daphnia magna***<sup>18, 26</sup>

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Test organism</b>        | <i>Daphnia magna</i> Straus (Cladocera, Crustacea), more than the third generation obtained by acyclic parthenogenesis under the conditions of healthy breeding, individuals younger than 24 hours since birth                                                                                           |
| <b>Biostat conditions</b>   | $21 \pm 2$ °C; $7.8 \pm 0.2$ ; laboratory conditions                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Control sample</b>       | diluting water prepared from the solutions of $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1), p.a., $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (2), p.a., $\text{NaHCO}_3$ (3), p.a., KCl (4), p.a. by the addition of solutions (1)-(4) per 10 ml and adding demineralized water into a volume of 1 liter |
| <b>Reference substance</b>  | $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , $\text{EC}_{50} = 0.82$ mg/l (limit 0.3 – 1.5 mg/l)                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Amount of the sample</b> | min. 5 ml per individual, maintaining the height of the solution column min. 3 cm                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Test duration</b>        | 24, 48 hours                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Basic test</b>           | 20 daphnia/undiluted sample (10 ml), same conditions for a control, more different concentrations and parallel tests                                                                                                                                                                                     |
| <b>Validity of the test</b> | immobilisation $\leq 10$ %, change of concentration of dissolved oxygen $\text{O}_2 \leq 2$ mg/l                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Monitored response</b>   | % of immobilised individuals, dissolved oxygen, pH and temperature, $\text{EC}_{50}$ ( $\text{EC}_x$ – the concentration of the toxicant, which causes the death of X % of the test organisms, or causes their immobilisation)                                                                           |

**Table 2: Conditions for the test of growth inhibition of common duckweed<sup>20,21, 26</sup>**

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Test organism</b>         | <i>Lemna minor</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Biotest conditions</b>    | Incubation temperature 25 °C ± 2 °C, simulation of day and night; lighting continually, min. intensity of 6 500 lux                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Control sample</b>        | Z-medium (was used as the nutrient solution and prepared in accordance with the instructions from its supplier - Culture Collection of Autotrophic Organisms - CCALA, Třeboň, the Czech Republic.                                                                                                                                                     |
| <b>Reference substance</b>   | 3,5-dichlorophenol, EC <sub>50</sub> = 2.75 mg/l (limit 2.2 – 3.8 mg/l)                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Amount of the sample</b>  | 50 ml                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Exposure</b>              | 7 days                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Basic test</b>            | 12 –15 leaves at the beginning, more different concentrations                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Criterion of validity</b> | average number of leaves in the control after the termination of the test > than octuple at the beginning of the test, pH at the end of the test < than 1.5 in comparison with initial pH                                                                                                                                                             |
| <b>Monitored parameters</b>  | the number of leaves is counted and the appearance of the leaves is evaluated (chlorosis, necrosis) at least three times during the test; growth inhibition (IC) in %; inhibition biomass in %, IC <sub>50</sub> (IC <sub>x</sub> - refers to X % inhibition of the growth of the monitored plant or growth rate at a given time compared to control) |

**Table 3: Conditions for the test for green algae<sup>23,24</sup>**

|                             |                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Test organism</b>        | <i>Scenedesmus subspicatus</i>                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Biotest conditions</b>   | 25 ± 2 °C; lighting continually, min. intensity of 5 000 lux                                                                                                                                                                    |
| <b>Control sample</b>       | Z-medium (10%) and deionized water (90%)                                                                                                                                                                                        |
| <b>Reference substance</b>  | K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , IC <sub>50, 72h</sub> = 1.1 mg/l (limit 0.5 – 2.0 mg/l)                                                                                                                         |
| <b>Amount of the sample</b> | min. 5 ml per individual, maintaining the height of the solution column min. 3 cm                                                                                                                                               |
| <b>Exposure</b>             | min. 72 hours                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Basic test</b>           | 50 – 70 ml of undiluted sample with the addition of inoculum, initial algal concentration: min. 10 <sup>3</sup> cells in 1 ml of the sample, gradually increasing the concentration of the sample with the addition of inoculum |
| <b>Monitored parameters</b> | cell growth (counting) every 24-hours (microscope NIKON ECLIPSE 50i, Bürker chamber), growth rate I <sub>μ</sub> , growth inhibition IC <sub>50</sub>                                                                           |

**Table 4: Conditions of test of inhibition of growth of root of *Sinapis alba*<sup>26</sup>**

|                             |                                                                                                                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Test organism</b>        | <i>Sinapis alba</i> , germination > 90%, per 30 seeds of <i>Sinapis alba</i> L. in Petri dishes                                          |
| <b>Biotest conditions</b>   | 20 °C ± 1 °C, thermostat TS 606 CZ/2-Var (WTW, Germany)                                                                                  |
| <b>Control sample</b>       | Reconstituted water                                                                                                                      |
| <b>Reference substance</b>  | K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , IC <sub>50, 72hours</sub> = 31.5 mg l <sup>-1</sup> (limit 4.1 – 85 mg L <sup>-1</sup> ) |
| <b>Amount of the sample</b> | 10 ml                                                                                                                                    |
| <b>Exposure</b>             | 72 hours                                                                                                                                 |
| <b>Basic test</b>           | 30 seeds in Petri dishes, more different concentrations                                                                                  |
| <b>Monitored parameters</b> | inhibition/stimulation of growth of root of <i>Sinapis alba</i> compared with the control (IC), preliminary test                         |

Results in graphs and tables are processed in the programme Microsoft Office - Excel and STATISTICA 12, ANOVA, one-factor analysis of variance (using 95 % intervals of reliability for average values of individual samples).

## Results and discussion

### Determination of physicochemical parameters

The aqueous extracts from the waste tires have increased pH value - alkaline, compared to the demineralized water used to prepare the extracts. Determined specific conductivity indicates a low rate of the concentration of the ions of the dissolved substances in water (demineralized water had a value of 0.1 mS/m). We determined the organic substances dissolved in aqueous extracts by chemical oxygen demand (Table 5). In the aqueous extract of the smaller particles, the parameters were higher.

**Table 5: Physicochemical parameters of the aqueous extracts**

| Parameter | pH   | specific conductivity (mS/m) | COD (mg/l) |
|-----------|------|------------------------------|------------|
| > 3 mm    | 7.85 | 3.62                         | 45.26      |
| < 1 mm    | 8.21 | 10.51                        | 62.84      |

### Ecotoxicological tests

The bioassays were performed as preliminary tests and after their evaluation, the basic tests were performed to determine  $IC_{50}$  and  $EC_{50}$ . Each test was at least 6 repetition.

#### Acute toxicity test on *Daphnia magna*

The immobilisation of *Daphnia magna* was determined by a preliminary test after 24 and 48 hours. Physicochemical parameters of the water leachates of the experimental samples are shown in Table 6. The results of the acute toxicity test on *Daphnia magna* are shown in Table 7. Results of the preliminary acute toxicity test with used the test organisms of *Daphnia magna* are:

- assessed as negative, if the immobilisation or the death of test organisms is < 50 % in comparison with the control - in this case, a verification test must be performed.
- assessed as positive, if the immobilisation or the death of test organisms is  $\geq 50$  % in comparison with the control - in this case, indicative and basic test must be performed and value  $EC_{50}$  needs to be determined<sup>26</sup>.

The preliminary test for the aqueous extract for the sample 1 (particle size > 3 mm) is negative (Table 7) and therefore no further testing is required. The tire sample with a particle size < 1 mm was immobilised on average 76 % of the individuals. For the basic test, the concentration range was selected the dilution of the aqueous extract.

**Table 6: Physicochemical parameters of the water leachates of the experimental samples**

|         | pH      |          | Dissolved oxygen [mg/l] |          | Temperature [°C] |          |
|---------|---------|----------|-------------------------|----------|------------------|----------|
|         | 0 hours | 48 hours | 0 hours                 | 48 hours | 0 hours          | 48 hours |
| Control | 8.89    | 8.85     | 10.2                    | 9.8      | 21.5             | 21.7     |
| > 3 mm  | 8.47    | 8.45     | 10.5                    | 9.8      | 21.5             | 21.7     |
| < 1 mm  | 8.59    | 8.44     | 10.2                    | 9.8      | 21.6             | 21.5     |

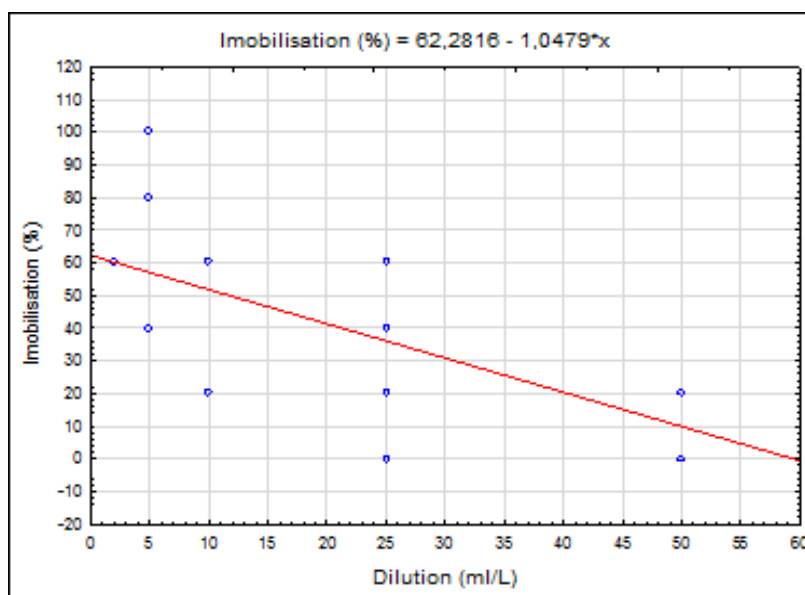
Based on the data in Table 6, we can state compliance with the monitored parameters.

The determined value  $EC_{50} = 8.53$  g/l (immobilisation of the test organisms *Daphnia magna*) after 48 hours was calculated according to the regression equation: Immobilisation (%) =  $62.2816 - 1.0479 \cdot x$  (Figure 1). Wik and Dave<sup>11</sup> found in a series of the extracts from the waste tires  $EC_{50}$  in the range of 0.55 – 5 g/l, after 48 hours. Marwood et al.<sup>9</sup> report the value  $EC_{50} = 5$  g/l in the extract, which was prepared at 44 °C. The authors studied the influence of the conditions on the preparation of the extracts (mainly temperature). The study shows the toxic effect of the waste tires on the aquatic environment, which was also confirmed by our experiments. We have shown a significant effect of the particle size, from which the extract was prepared. The particle size affects the solubility of the substances contained in the

samples of the waste tire in demineralized water. It causes increasing the immobilisation of *Daphnia magna* in comparison with the samples, which had a particle size > 3 mm.

**Table 7: Basic statistical characteristics of test acute toxicity for *Daphnia magna* – preliminary test**

| Sample | Immobilisation, after 48-hours (%) |                |                           |             |
|--------|------------------------------------|----------------|---------------------------|-------------|
|        | Average                            | Standard error | 95 % Confidence intervals |             |
|        |                                    |                | lower limit               | upper limit |
| > 3 mm | 23                                 | 1.25           | 19.77                     | 27.73       |
| < 1 mm | 76                                 | 2.39           | 68.63                     | 83.87       |



**Figure 1: Immobilisation of *Daphnia magna* in the aqueous extract of the ground tire sample**

### Test of inhibition (stimulation) of the growth of *Lemna minor*

During the seven-day exposure, the number of the leaves in the samples was counted every 24-hours (including start and end of the test). At the same time, the appearance of the test organisms was observed. The death of the leaf, necrosis and chlorosis were not recorded. The growth inhibition ( $I_{\mu i}$ ; %) is shown in Table 8.

**Table 8: Growth inhibition ( $I_{\mu i}$ ; %) of *Lemna minor***

| Sample | Growth inhibition ( $I_{\mu i}$ ; %) |                |                           |             |
|--------|--------------------------------------|----------------|---------------------------|-------------|
|        | Average                              | Standard error | 95 % Confidence intervals |             |
|        |                                      |                | lower limit               | upper limit |
| > 3 mm | 27.11                                | 0.40           | 25.85                     | 28.37       |
| < 1 mm | 45.06                                | 0.66           | 42.98                     | 47.15       |

The test is negative if the growth inhibition is < 30 % or stimulation is < 75%, compared to the control<sup>21</sup>. The results showed that a both groups of the samples were negative. The leachate of the samples with a particle content < 1 mm caused 17.84 % greater inhibition of the growth inhibition compared to the samples with a particle content > 3 mm. The test organism *Lemna minor* has been used successfully to evaluate the toxic effects of the chemicals for several years<sup>20</sup>. Based on the experience<sup>23</sup>, we have included this test in the environmental risk assessment of the samples. The toxicity test with *Lemna minor* is important in the whole set of the different toxicity tests.

## Growth inhibition test of green algae

During the seven-day exposure to *Scenedesmus subspicatus*, we recorded the numbers of the cells in the samples each day (including start and end of the test). At the same time, the appearance of the colonies was observed. Based on the results of the growth rate inhibition  $I_p$  (Table 9) the test is negative. The test is negative if the inhibition of the algal culture growth is < 50 % compared to the control - in this case no further testing is performed.

**Table 9: Growth inhibition ( $I_p$ ; %) of green algae**

| Sample | Growth inhibition ( $I_p$ ; %) |                |                           |             |
|--------|--------------------------------|----------------|---------------------------|-------------|
|        | Average                        | Standard error | 95 % Confidence intervals |             |
|        |                                |                | lower limit               | upper limit |
| > 3 mm | 27.17                          | 0.65           | 25.11                     | 29.24       |
| < 1 mm | 44.56                          | 1.39           | 40.12                     | 48.99       |

The test results are negative for both fractions. The inhibition of the aqueous extract of the fraction > 3 mm is 17.39 % lower compared to the inhibition of the aqueous extract of the fraction < 1 mm. Gaultieri et al.<sup>25</sup> confirmed the inhibition of the growth rate of the freshwater green algae *Rahidocelis subcapita* after 72 hours in leachate with 50 g of the waste tires in one liter of water. The study<sup>13</sup> evaluated the effect of the chemical content of freshwater and marine extracts made from the car waste tires on the microalgae *Raphidocelis subcapitata* (freshwater) and *Skeletonema costatum* (marine). Current additives such as benzothiazole, cobalt, zinc have been identified in high concentrations. The extracts with the value  $EC_{50}$  ranging from 0.5 % to 64 % of the total concentration (100 g/l) inhibited algal growth. The study provides evidence of a relationship between the chemical composition and toxicity of the plastic extracts/rubber extracts. With the increasing contamination of the organic and inorganic additives, the extracts ranged from mild to highly toxic to algae. It emphasizes need better understanding of the overall impact chemicals associated with the plastics to the aquatic ecosystems. The ingredients are considerably diluted in the natural environment however, the value  $EC_{50}$  determined in this study on algae showed that they can pose a danger in closed ecosystems (bays, lagoons or lakes) or in oceanic "hotspots" where plastics accumulate.

## Test of the growth inhibition of the root of *Sinapis alba*

From the measured root lengths of *Sinapis alba*, we calculated the inhibition of the root growth  $I_i$  (%). The test is negative, if the inhibition of the root growth compared to the control is < 30% or the stimulation < 75%, then no further testing is required, by STN 83 8303. The calculated values of *Sinapis alba* root growth inhibition is shown in Table 10. The aqueous extract obtained from waste tires shall not have a phytotoxic effect on the seed species of the higher cultivated plant used.

**Table 10: Inhibition of *Sinapis alba* root growth compared to the control**

| Sample | $I_i$ (%) |
|--------|-----------|
| > 3 mm | 40,88     |
| < 1 mm | 42,23     |

## Conclusion

The ecotoxicity is one of the several hazardous properties of the waste. The ecotoxicity is an acute or delayed hazard due to adverse effects on the environment, bioaccumulation or toxic effects on biotic systems. The aim of the case study was to evaluate the toxicity of the aqueous extracts prepared by grinding whole the waste tires. Only metal parts were removed. Experimental samples prepared by cryogenic milling to a particle size < 1 mm caused higher inhibition. Contamination of the aqueous leachate in the water with dissolved organic substances from the waste was demonstrated by COD parameter. All extracts were alkaline.

Aquatic tests with the using test organisms *Lemna minor*, *Scenedesmus subspicatus* and *Daphnia magna* were positive, however, terrestrial test was negative. *Lemna minor* is one of the frequently occurring organisms in the aquatic environment that's why we used them<sup>27, 28</sup>.

We confirmed the sensibility of the use of test organisms *Lemna minor* for the toxicity assessment also of this type of the samples. The significant impact of the homogenization of the samples by grinding (particle size) was confirmed. The presence of inorganic and organic components in the tire causes the toxicity of the aqueous extracts. However, most toxicological studies were focused on the samples prepared from the tire tread. The results of this study are useful in practice in the recovery of the waste tires as waste in various applications.

## Acknowledgments

The research presented in this study is the result of the UNIVNET project "University Research Association for Waste Evaluation, especially in the Automotive Industry" financed by The Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic.

## References

1. Mohee, R. et al. Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. In Waste Manager. ISSN 1624-1629, 2008, vol. 28, p. 1.
2. Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, V. J., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, Md T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Maghool, F., 2020. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. In Resour., Conserv. Recycl. Vol. 155, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
3. Regulation No. 365 (2015): Coll. Waste Catalog
4. Radvanská, A. Gumový granulát z pneumatik. In Odpady. ISSN 1210-4922, 2007, roč. 17, č. 4, s. 10 – 11.
5. Fazekáš, J., Fazekášová, D., Chovancová, J., 2020. Soil Material Quality and Environmental Potential of Metallically Contaminated Soils. In Key Engineering Materials, 838.
6. Procházka, O. Pneumatiky. Odpadové Fórum. ISSN 1212-7779, 2004, roč. 5, č. 1, s. 10 – 19.
7. Wik A., Dave G. 2005. Environmental labeling of car tires-toxicity to *Daphnia magna* can be used as a screening method. Wik A., Dave G. In Chemosphere. Vol. 58. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.103>
8. Wik A., Dave G., 2006. Acute toxicity of leachates of tire wear material to *Daphnia magna* – Variability and toxic components. Chemosphere 64, 1777 – 1784. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.103>
9. Marword, C. C, McAtee B, Kreider M, Ogle RS, Finley B, Sweet L, Panko J. 2011. Acute aquatic toxicity of tire and road wear particles to alga, daphnid and fish. Ecotoxicology 20, 2079 – 2089. <https://10.1007/s10646-011-0750-x>
10. Panko, J.M., Kreider, M.L., McAtee, B.L. et al. Chronic toxicity of tire and road wear particles to water- and sediment-dwelling organisms. Ecotoxicology 22, 13 – 21 (2013). <https://10.1007/s10646-020-02227-y>

11. Wik, A., Nilsson, E., Källqvist, T., Tobiesen, A., Dave, G. 2009. Toxicity assessment of sequential leachates of tire powder using a battery of toxicity tests and toxic identification evaluations, *Chemosphere*, Vol. 77, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.034>.
12. Khan, F. R. Boyle, Halle, L. L., Palmqvist, A., 2019. Acute and long-term toxicity of micronized car tire wear particles to *Hyalella azteca*. *Aquat. Toxicol.* 216, <http://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.05.018>
13. Capalupo, M., Sorensen, L., Kongalage, J., R., Booth, A. M., Fabbri, E. 2020. Chemical composition and ecotoxicity of plastic and car tire rubber leachates to aquatic organisms. *Water research* 169. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115270>
14. Duda A, Kida M, Ziembowicz S, Koszelnik P. 2020. Application of material from used car tyres in geotechnics—an environmental impact analysis. *PeerJ* 8:e9546 <https://doi.org/10.7717/peerj.9546>
15. Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, V. J., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, Md T., Kurmus, H., i Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Maghool, F. 2020. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review, *Resour., Conserv. Recycl.* 155, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
16. LaPlaca, S.B., van den Hurk, P. Toxicological effects of micronized tire crumb rubber on mummichog (*Fundulus heteroclitus*) and fathead minnow (*Pimephales promelas*). *Ecotoxicology* 29, 524 – 534 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02210-7>
17. STN EN ISO 10523/Z1: 2012. Kvalita vody. Stanovenie pH (ISO 10523: 2008)
18. OECD 202 I.: 2004. *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test, <https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>
19. STN EN 27888: 1998. Kvalita vody. Stanovenie elektrolytickej vodivosti, ISO 7888:1985.
20. OECD 221: 2006. *Lemna* sp. Growth Inhibition Test, <https://doi.org/10.1787/9789264016194-en>
21. STN EN ISO 20079: 2008-07. Water quality. Determination of the toxic effect of water constituents and waste water on duckweed (*Lemna minor*). Duckweed growth inhibition test
22. STN ISO 15705: 2005. Kvalita vody. Stanovenie chemickej spotreby kyslíka (CHSK). Skúšavková metóda pre malé objemy vzoriek.
23. Hybská, H., Samešová, D. 2015. *Ecotoxicology Zvolen* : Technical University in Zvolen, ISBN 978-80-228-2750-8
24. OECD (2011), Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069923-en>.
25. Gualtieri M, Andrioletti M, Vismara C, Milani M, Camatini M. Toxicity of tire debris leachates. *Environ Int.* 2005 Jul;31(5) 723 – 730. doi:10.1016/j.envint.2005.02.001. PMID: 15910969.
26. STN 838303: 1999. Skúšanie nebezpečných vlastností odpadov. Ekotoxická. Skúšky akútnej toxicity na vodných organizmoch a skúšky inhibície rastu rias a vyšších kultúrnych rastlín.
27. Hybská, H., Lobotková, M., Vanek, M., Salva, J., Knapcová, I., Veverková, D. 2020. Biomonitoring and its in the assessment of the quality of wastewater treatment process. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management.* <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100292>.
28. Veľková, V., Hybská, H., Bubeníková, T., Knapcová, I. 2018. The effect of some sorbents used to the oil leaks disposal. In *Waste Forum* 2018, 3, 307 – 313.

## Ekotoxikologické účinky výluhu z použitých pneumatík na životné prostredie

**Helena HYBSKÁ, Dagmar SAMEŠOVÁ, Martina LOBOTKOVÁ**

*Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Katedra environmentálneho inžinierstva, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen*

### **Souhrn**

*Ekotoxická patrí k jednej z viacerých nebezpečných vlastností odpadov a v dôsledku nepriaznivého pôsobenia na životné prostredie svojimi toxickými účinkami na biotické systémy, predstavuje akútne či oneskorené nebezpečenstvo. Dôležitým odvetvím v odpadovom hospodárstve sú vyradené odpadové pneumatiky, ktorých množstvo vplyvom rozvoja automobilového priemyslu každým rokom rastie.*

*Prípadová štúdia je zameraná na zhodnotenie environmentálnych vplyvov odpadových pneumatík na akvatické prostredie ako zložku životného prostredia použitím biotestov. Odpadové pneumatiky boli pre stanovenie upravené na drvenú a mletú vzorku, z ktorých sa pripravili vodné výluhy. Na ekotoxikologické skúšanie boli použité tri akvatické ekotoxikologické testy, a to test akútnej toxicity na *Daphnia magna*, test inhibície rastu *Lemna minor* a test inhibície rastu *Scenedesmus subspicatus*, a jeden terestrický test s použitím semien vyššej kultúrnej rastliny *Sinapis alba*. Na základe pozitívnych výsledkov z jednotlivých predbežných testov boli uskutočnené základné testy a stanovené hodnoty  $EC_{50}$  a  $IC_{50}$ . Najvýznamnejšia toxicita bola preukázaná vo vodnom výluhu zo vzorky mletej pneumatiky, pričom najcitlivejším testovacím organizmom, ktorý vykazoval najvyššiu toxicitu boli perloočky *Daphnia magna*. Zistilo sa, že na ekotoxicitu má výrazný vplyv príprava vzorky – veľkosť častíc. Z uvedeného vyplýva, že opotrebované pneumatiky predstavujú pre vodné prostredie environmentálne riziko.*

**Kľúčová slova:** odpadové pneumatiky, vodné prostredie, toxicita, ekotoxikologické testy, environmentálne riziko

## Současné možnosti zvyšování využití stavebního a demoličního odpadu ve stavebnictví

**Zdeněk PROŠEK<sup>a</sup>, Tereza PAVLŮ<sup>b</sup>, Milan RYDVAL<sup>c</sup>, Jan VALENTIN<sup>a</sup>, Martin LIDMILA<sup>a</sup>, George KARRA´A<sup>d</sup>, Jiří PODOLSKÝ<sup>e</sup>, Jan FOLTÝN<sup>f</sup>, Pavel TESÁREK<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, e-mail: zdenek.prosek@fsv.cvut.cz

<sup>b</sup> České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, Třinecká 1024, 273 43 Buštěhrad

<sup>c</sup> České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 160 00 Praha 6-Dejvice

<sup>d</sup> Lavaris, s.r.o., Areál Šroubáren 43, 252 66 Libčice nad Vltavou

<sup>e</sup> Moravostav Brno, a.s., Maříkova 1899/1, 621 00, Brno-Řečkovice

<sup>f</sup> Tomáš STRAUB, s.r.o., Ostravská 1847, 748 01 Hlučín

### Souhrn

Předložený článek je zaměřený na současné trendy ve stavebnictví, které jsou spojeny s využitím stavebního a demoličního odpadu, a to opětovně ve stavebnictví, jak v pozemním stavitelství, tak v dopravní infrastruktuře. V souladu s principy udržitelného rozvoje jsou hledány další moderní a perspektivní způsoby na efektivní využití stavebního a demoličního odpadu. Celosvětovou snahou je využít co největší množství odpadu a minimalizovat, v ideálním případě úplně zakázat skládkování. V článku jsou prezentovány nové možnosti s dalším potenciálem a jsou zde představeny příklady experimentálního výzkumu provedené na ČVUT v Praze v několika posledních letech. Konkrétně jsou představeny dílčí výsledky ze čtyř různých výzkumů.

**Klíčová slova:** stavební demoliční odpad, recyklace, pozemní stavby, dopravní infrastruktura.

### Úvod

V současné době jsou hledány způsoby, jak efektivně využít recyklované materiály a druhotné suroviny jako náhrady přírodních materiálů. Velký potenciál má stavební demoliční odpad (SDO), a to ten, který nově vzniká, ale i ten doposud skládkovaný, který prozatím nenašel efektivní využití. Z pohledu dalšího využití je možné upravený stavební demoliční odpad aplikovat ve stavebnictví ve dvou základních oblastech, a to pozemním stavitelství a dopravní infrastruktuře. V obou případech je při nakládání s SDO komplikovaná legislativa a obecně převážně negativní zkušenosti s nesprávnou aplikací recyklátů v minulosti. Jestliže chceme v blízkém horizontu zvýšit množství opětovně využitého SDO, je nutné upravit současnou legislativu a představit nová řešení, která se budou na SDO dívat jiným pohledem. Ideálně tak, že již před demolicí budou provedeny kroky např. ve formě předdemoličního auditu, a na základě jeho výsledků budou hledány optimalizované postupy, jak SDO efektivně upravit nebo separovat a po následné úpravě opětovně využít v souladu s moderními trendy.

### Pozemní stavitelství

Především v oblasti dalšího využití SDO ve stavebnictví je vhodné materiál rozdělit podle frakcí, resp. zrnitosti, a to na materiály frakce 0/4 a 4/16 mm.

## **Využití frakce 0/4 mm jako plniva a pojiva**

Frakce 0/4, resp. 0/1 mm, je do jisté míry specifická z pohledu dalšího využití. V mnoha případech je chápána pouze jako odpad, který není možné dále použít při náhradě jemných frakcí kameniva v betonu. Hrubší frakce lze zpracovat ve formě recyklovaného kameniva, ale v případě jemné frakce recyklovaného SDO dosud neexistuje ideální řešení, které by umožnilo její využití v širším měřítku. Na druhou stranu se ukazuje v mnoha výzkumech, že se může jednat o materiál s vysokým potenciálem dalšího využití. Proces úpravy jemné frakce SDO, který by vedl k její implementaci, zcela závisí na konkrétní "úloze", jakou má materiál plnit, a může se značně měnit. Specifické je i to, že tato frakce vzniká i při úpravách stavebního demoličního odpadu, např. při úpravě a drcení recyklátu na kamenivo příslušné frakce pro použití v betonu.

Dle normy ČSN EN 206<sup>1</sup> je jemná frakce SDO brána jako inertní příměs, která se nepodílí na hydrataci cementu, a proto nekontaminované (hlínou nebo jinými materiály) materiály na bázi betonu nebo cihelného střeptu s maltou je možné primárně využít jako plnivo, resp. při úpravě zrnitosti pomocí vysokorychlostního mlýna na mikroplnivo<sup>2</sup>. Jenže v případě recyklovaných materiálů na bázi betonu jej lze využít i ve formě pojiva (resp. částečné náhrady pojiva), protože stará cementová pasta obsahuje množství zrn, která ještě nejsou zhydratována<sup>3</sup>. Pomocí mletí nebo dalších úprav je možné v cementové pastě tato zrna odhalit a mohla by tudíž i znovu reagovat. Díky tomu by mohly být velmi jemné frakce recyklovaného betonu využity jako částečná náhrada běžného cementu. Navíc se ve staré cementové pastě nacházejí další sloučeniny, které je možné dále využít při hydratačních procesech v cementu díky specifickému chemickému a mineralogickému složení. Jedná se především o možnost vytvoření tzv. nukleačních center v průběhu hydratace portlandského cementu<sup>4</sup>.

Další výzkum ukázal, že proces hydratace v cementových kompozitech je možné ještě podpořit druhotnými surovinami, jako je například struska nebo popílek, kde dokonce nemusí být splněny podmínky normy ČSN EN 450-1<sup>5</sup> pro použití popílku do betonu. Ve většině případů stačí úprava tvaru zrn a zrnitosti příměsí<sup>6</sup>. Další možností je využití "necementových" pojiv, např. při kombinaci strusky, popílku, sádrovce a vápna, případně i betonového recyklátu do tzv. geopolymérů, které jsou připravovány z hlinito-křemičitanových materiálů jejich geopolymérací v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku<sup>7</sup>. V posledních letech se množství běžně používaných substitucí za cement nezvyšuje, ale spíše stagnuje. V celosvětovém měřítku je v posledních letech využíváno jako pojivo v produkci betonu 7 hm. % vápence, 5 hm. % strusky, 4 hm. % popílku, 2 hm. % pucolánů a další materiály tvoří pouze do 1 hm. %<sup>8</sup>. Zbýlý materiál používaný jako pojivo je portlandský cement. Omezené množství využití náhrad za cement je způsobeno omezeným množstvím suplementů a jejich heterogenitou. Proto se hledají jiné možnosti náhrad, jako jsou kalcinované jíly nebo jemné frakce betonového recyklátu, u kterých nejsme limitováni množstvím materiálu. Jednou z možností je využití tzv. LC3. Jedná se o vápencový kalcinovaný hliněný cement, který je složen z 50 hm. % slínkem, 15 hm. % vápencem, 30 hm. % kalcinovaným jílem a 5 hm. % sádrovcem. Nevýhodou tohoto řešení je, že většina celosvětových zásob kalcinovaného jílu je v oblasti Číny, střední Afriky a jižní Ameriky, tzn. pro evropský trh nedostupná<sup>9</sup>.

Z uvedeného důvodu je pro evropský trh lepší možností využití jemné frakce betonového recyklátu, kde jsou známy možnosti náhrady až do 20 hm. % bez použití chemických přísad<sup>3</sup> a v kombinaci s chemickými přísadami až do 50 hm. %<sup>10</sup>. Obecně je zásadní způsob úpravy recyklátu a jeho efektivní využití, resp. efektivně využít příslušný potenciál recyklátů (z hlediska jejich chemického a mineralogického složení). Mezi efektivní způsoby tzv. aktivace může patřit např. i vysokorychlostní mletí, které není energeticky náročné a lze jej tak použít pro efektivní zpracování betonového recyklátu, resp. jeho vybraných frakcí.

V rámci jednoho z experimentů byly zkoumány možné náhrady cementu dostupné na evropském trhu. Označení jednotlivých testovaných směsí je podle převládající složky náhrady portlandského cementu CEM I 42,5R Radotín v pojivu. Všechny testované suché směsi obsahovaly 13 hm. % pojiva (resp. cementu a náhrady cementu) a 87 hm. % plniva. Jako pojivo byla použita drcená vysokopecní struska z Kladna, vápenný hydrát Čertovy schody, fluidní popílek z Kladna a sto let starý recyklovaný beton z areálu Waltrovka upravený pomocí vysokorychlostního mletí. Jako lehčené kamenivo byla použita drcená vysokopecní struska frakce 0/4 a 4/8 mm v poměru 7:1 hm. dílů. Vodní součinitel pro všechny směsi byl 0,6 (voda/pojivo), složení je specifikováno v tabulce 1. Pro testování byly použity

vzorky krychlí o hraně 100 mm a vzorky 40×40×160 mm. Porovnání vybraných vlastností pro vzorky staré 28 dní je uvedeno v tabulce 2. Z ní je patrné, že při redukci, resp. přepočtu na "čistý" cement, je možné dosáhnout vhodných užitných vlastností cementových kompozitních materiálů. Při výzkumu nebyly záměrně použity chemické přísady a bylo použito vysoké množství náhrady, aby bylo možné ověřit potenciál náhražek cementu. Z pohledu dalších aplikací by mohly být uvedené směsi použité např. při výrobě vibrolisovaných prvků.

**Tabulka 1: Složení pojiva v testovaných směsích [hm. %].**

| Složka / Označení            | CEM  | POP | STR | REC |
|------------------------------|------|-----|-----|-----|
| CEM I 42,5R Radotín          | 13,0 | 6,0 | 6,0 | 5,2 |
| Mikromletý betonový recyklát | 0    | 2,0 | 2,0 | 6,5 |
| Vysokopeční struska          | 0    | 1,7 | 3,5 | 1,0 |
| Vápenný hydrát               | 0    | 0   | 0   | 0,3 |
| Popílek                      | 0    | 3,3 | 1,5 | 0   |

**Tabulka 2: Porovnání vlastností pro vzorky staré 28 dní (včetně směrodatných odchylek).**

| Naměřené fyzikální vlastnosti / Označení           | CEM      | POP      | STR      | REC      |
|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] ČSN 73 1315 | 2114±13  | 2077±14  | 2042±10  | 1983±6   |
| Pevnost v tlaku [MPa] EN 12390-3                   | 22,6±0,6 | 19,9±1   | 14,3±0,7 | 14,8±0,3 |
| Pevnost v tahu za ohybu [MPa] EN 1015-11           | 5,6±0,2  | 4,5±0,1  | 4,4±0,1  | 4,8±0,1  |
| Dyn. modul pružnosti [GPa] ČSN 73 1372             | 24,1±0,1 | 20,2±0,5 | 19,2±0,5 | 15,9±0,2 |
| Dyn. smykový modul [GPa] ČSN 73 1372               | 10,0±0,1 | 8,0±0,3  | 7,8±0,2  | 6,7±0,1  |

### **Využití frakce 4/16 mm jako plniva**

Norma ČSN EN 206+A1<sup>1</sup> v současné době zavádí dva základní pojmy ohledně recyklovaného kameniva. Prvním druhem je kamenivo regenerované a druhým pak kamenivo recyklované. Regenerované kamenivo je získáváno vyplachováním jemných částic z čerstvého betonu. Takto získané kamenivo je ovšem možné použít pouze výrobcem nebo skupinou výrobců a nelze jej využít více než 5 % celkového množství kameniva. Při dávkách regenerovaného kameniva vyšších než 5 % je nutno toto kamenivo roztřídit na jemnou a hrubou frakci splňující požadavky ČSN EN 12620<sup>11</sup>. Pro hrubé drcené recyklované kamenivo, v dávce vyšší než 5%, pak platí stejná pravidla, jako pro kamenivo recyklované. Norma ČSN EN 206<sup>1</sup> upravuje možnosti použití hrubého recyklovaného kameniva ( $d > 4$  mm) v závislosti na expoziční třídě, druhu recyklovaného kameniva. Recyklované kamenivo druhu A musí být tvořeno z minimálně 90 % recyklovaného betonu, betonových výrobků, malty a betonových zdících prvků (kategorie Rc<sub>90</sub> dle ČSN EN 933-11<sup>12</sup>) nebo z 95 % recyklovaného betonu, nestmeleného kameniva a hydraulicky stmeleného kameniva (kategorie Rcu<sub>95</sub><sup>12</sup>) nebo méně než 10 % ostatních složek, jako jsou cihly, dlaždice, vápenopískové zdící prvky a neplovoucí provzdušněný beton (kategorie Rb<sub>10</sub><sup>12</sup>). Recyklované kamenivo typu B musí být tvořeno z minimálně 50 % recyklovaného betonu, betonových výrobků, malty a betonových zdících prvků (kategorie Rc<sub>50</sub><sup>12</sup>) nebo ze 70 % recyklovaného betonu, nestmeleného kameniva a hydraulicky stmeleného kameniva (kategorie Rcu<sub>70</sub><sup>12</sup>) nebo méně než 30 % ostatních složek, jako jsou cihly, dlaždice, vápenopískové zdící prvky a neplovoucí

provzdušněný beton (kategorie Rb<sub>30</sub><sup>12</sup>). Recyklované kamenivo druhu B se dle ČSN EN 206+A1<sup>1</sup> nesmí používat pro betony vyšších pevnostních tříd než C 30/37. Pro ostatní materiály, jako je asfalt, sklo, kovy, sádrová omítka aj., je u recyklovaného kameniva typu A i B stanoven obsah částic v řádech procent.

Maximální množství, které je možné použít pro betony do expoziční třídy X0, je 50 % hrubého recyklovaného kameniva druhu A i B. Do tříd XC1-C4, XF1, XA1 a XD1 je možné použít maximálně 30 % hrubého recyklovaného kameniva typu A a do tříd XC1 a XC2 je možné použít 20 % hrubého recyklovaného kameniva typu B. Z omezení této normy vyplývá, že z hlediska trvanlivosti je beton s recyklovaným kamenivem nejméně ohrožen karbonatací (třídy XC) a více pak působením mrazu (třídy XF) a dalších chemických látek (třídy XA). Z uvedených limitů vyplývá využití betonu s recyklovaným kamenivem pro základové konstrukce (třídy X0, XC1) a dále pro konstrukce v interiéru.

Norma ČSN EN 12620<sup>11</sup> dále ukládá postupy zkoušení recyklovaného kameniva, které je ve většině případů stejné jako pro přírodní kamenivo. Navíc se ověřuje složení recyklovaného kameniva, které je důležité pro zařazení do druhů kameniva<sup>12</sup>. Mimo běžné zkoušky kameniva se dále ověřuje obsah vodou rozpustných síranů v recyklovaném kamenivu, posuzuje se vliv vodou rozpustných látek z recyklovaného kameniva na počáteční dobu tuhnutí cementové kaše a potenciál alkalicko-křemičité reakce. Norma dále stanovuje četnost ověřovacích zkoušek recyklovaného kameniva, které je četnější v porovnání s přírodním kamenivem. Norma ČSN EN 206<sup>1</sup> dále uvádí minimální objemové hmotnosti pro recyklované kamenivo do betonu, které je 2100 kg/m<sup>3</sup> pro typ A a 1700 kg/m<sup>3</sup> pro typ B. Objemová hmotnost recyklovaného betonového kameniva z českých recyklačních středisek výše uvedené limity většinou splňují. Maximální nasákavost kameniva není v této české verzi normy, na rozdíl od zahraničních, stanoven, avšak je třeba ji určit. V zahraničních normách se maximální povolená nasákavost pohybuje kolem 10 ± 2 %. Nasákavost betonového recyklovaného kameniva z českých recyklačních středisek se pro frakci 4/8 mm pohybuje mezi 6 a 12 % a pro 8/16 mm mezi 2 a 10 %<sup>13</sup>.

Recyklované betonové kamenivo je možné získat v různé kvalitě, která je většinou závislá na jeho složení. Za nejkvalitnější recyklované betonové kamenivo je považováno to, které vzniklo rozdrčením betonových fragmentů povětšinou z více-cyklové recyklace a obsahuje tak pouze přírodní kamenivo a cementový tmel. Složení a původ recyklovaného kameniva ovlivňuje jeho vlastnosti, jako jsou objemová hmotnost, nasákavost, mrazuvzdornost, odolnost proti otěru a drcení a další. V porovnání s přírodním kamenivem jsou vlastnosti recyklovaného kameniva horší, a to hlavně jeho nasákavost, která se podle složení pohybuje mezi 3 a 11 %<sup>14</sup>, některé zdroje uvádějí až 15% nasákavost recyklovaného kameniva<sup>15</sup>. Důvodem pro vyšší nasákavost je vyšší pórovitost kameniva způsobená především cementovým tmelem. Recyklované cihelné kamenivo má pak nižší objemovou hmotnost než recyklované betonové kamenivo, avšak většinou splňuje požadavek normy kameniva typu B. Nasákavost recyklovaného cihelného kameniva je pak ještě vyšší v porovnání s recyklovaným betonovým kamenivem, a to od 10 do 20 %<sup>16-19</sup>.

Zvýšená nasákavost betonu s recyklovaným kamenivem, která je ve srovnání s běžným betonem o 20 až 100 % vyšší<sup>20</sup>, negativně ovlivňuje trvanlivost betonu, a to především mrazuvzdornost a odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL). Proto je výhodnější používat beton s recyklovaným kamenivem v konstrukcích, které nejsou příliš namáhány klimatickými vlivy, tj. v zemině a interiéru. Další výhodou pro použití betonu s recyklovaným kamenivem do základových konstrukcí je možnost použití betonů s nižší pevností, kde dochází k nižším poklesům mechanických a deformačních vlastností ve srovnání s běžným betonem<sup>20</sup>.

V rámci jednoho z aktuálních výzkumů realizovaných na ČVUT v Praze byla optimalizována receptura s plnou náhradou hrubého přírodního kameniva (PK) kamenivem recyklovaným z betonového recyklátu (RBK) a s různým množstvím cementu a vodním součinitelem, do kterého byla započtena voda pro přednasáknutí kameniva. Celkem bylo navrženo sedm betonových směsí pevnostních tříd C16/20 a C25/30. Pro každou pevnostní třídu byla navržena referenční receptura bez použití recyklovaného kameniva. Pro třídu C16/20 pak byly navrženy tři receptury s náhradou 30, 50 a 100 % hrubého kameniva kamenivem recyklovaným a pro třídu C25/30 dvě receptury s náhradou 30 a 100 % přírodního kameniva betonovým recyklátem. Ve všech směsích byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R a pro

snadné porovnání měly všechny směsi stejný efektivní vodní součinitel a obsahovaly stejný přírodní písek. Navržené receptury jsou uvedeny v tabulce 3.

**Tabulka 3: Receptury betonů s částečnou nebo plnou náhradou přírodního kameniva (PK) hrubým recyklovaným betonovým kamenivem (RBK).**

| Složení/<br>vzorek | REF<br>16/20 | REC<br>16/20<br>C30 | REC<br>16/20<br>C50 | REC<br>16/20<br>C100 | REF<br>25/30 | REC<br>25/30<br>C30 | REC<br>25/30<br>C100 |
|--------------------|--------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| Cement             | 260          | 260                 | 260                 | 260                  | 300          | 300                 | 300                  |
| Voda               | 169          | 184                 | 206                 | 211                  | 165          | 183                 | 208                  |
| PK (0/4 mm)        | 100 %        | 100 %               | 100 %               | 100 %                | 100 %        | 100 %               | 100 %                |
| PK (4/16)          | 100 %        | 70 %                | 50 %                | 0 %                  | 100 %        | 70 %                | 0 %                  |
| RBK (0/4 mm)       | 0 %          | 0 %                 | 0 %                 | 0 %                  | 0 %          | 0 %                 | 0 %                  |
| RBK (4/16 mm)      | 0 %          | 30 %                | 50 %                | 100 %                | 0 %          | 30 %                | 100 %                |
| Vodní součinitel   | 0,65         | 0,71                | 0,79                | 0,81                 | 0,55         | 0,65                | 0,69                 |

**Tabulka 4: Shrnutí fyzikálních a mechanických vlastností pro zkoušené materiály.**

| Směs        | Objemová<br>hmotnost<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Pevnost v<br>tlaku [MPa] | Pevnost v<br>tahu za ohybu<br>[MPa] | Modul<br>pružnosti v<br>tlaku [GPa] | Třída betonu |
|-------------|----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| REF 16      | 2262±9,95                                    | 31,43±0,54               | 4,41±0,38                           | 25,7±0,21                           | C25/30       |
| REC 16 C30  | 2193±10,96                                   | 32,36±0,57               | 5,63±0,33                           | 28,9±1,88                           | C25/30       |
| REC 16 C50  | 2208±7,28                                    | 33,50±0,31               | 4,98±0,16                           | 25,4±0,50                           | C25/30       |
| REC 16 C100 | 2057±13,27                                   | 22,25±0,84               | 3,28±0,41                           | 18,0±0,24                           | C16/20       |
| REF 25      | 2256±6,71                                    | 31,23±0,74               | 4,41±0,38                           | 25,7±0,21                           | C25/30       |
| REC 25 C30  | 2193±10,96                                   | 32,36±0,57               | 5,37±0,38                           | 28,5±0,51                           | C25/30       |
| REC 25 C100 | 2106±6,95                                    | 31,99±0,37               | 4,03±0,34                           | 24,5±4,83                           | C25/30       |

Směsi s 30% a 50% náhradou hrubé frakce byly navrženy tak, aby odpovídaly požadavkům norem<sup>1, 11</sup>. U ostatních směsí byl nahrazen vyšší poměr hrubého přírodního kameniva, a to až 100 %. Z výsledků pilotních mechanických zkoušek, jejichž průměrné výsledky jsou uvedené v tabulce 4, vyplývá, že při náhradě do 50 % recyklovaným kamenivem nedošlo u betonu třídy C16/20 k výraznějšímu poklesu mechanických parametrů. Při náhradě 100 % kameniva splňuje receptura REC 16 C100 pevnostní třídu betonu C16/20 i přes pokles v pevnosti v tlaku. Pro recepturu betonu třídy C25/30 nedošlo k zásadnímu zhoršení mechanických parametrů při náhradě přírodního hrubého kameniva kamenivem recyklovaným. Vyšší pokles je patrný zejména u modulu pružnosti. Z uvedených výsledků lze odvodit možnost využití vyšších náhrad recyklovaného kameniva (vyšších, než stanovuje ČSN EN 206+A1<sup>1</sup>) zejména pro betony nižších pevnostních tříd, které jsou používány pro základové konstrukce, výplňové betony, konstrukce bez statické funkce aj. U betonu vyšších pevnostních tříd používaných pro konstrukce se statickou

funkcí je kromě pevnosti betonu v tlaku vždy vhodné stanovit i modul pružnosti betonu, který ovlivňuje deformační parametry a chování prvku.

## Dopravní infrastruktura

### Využití SDO v železničním stavitelství

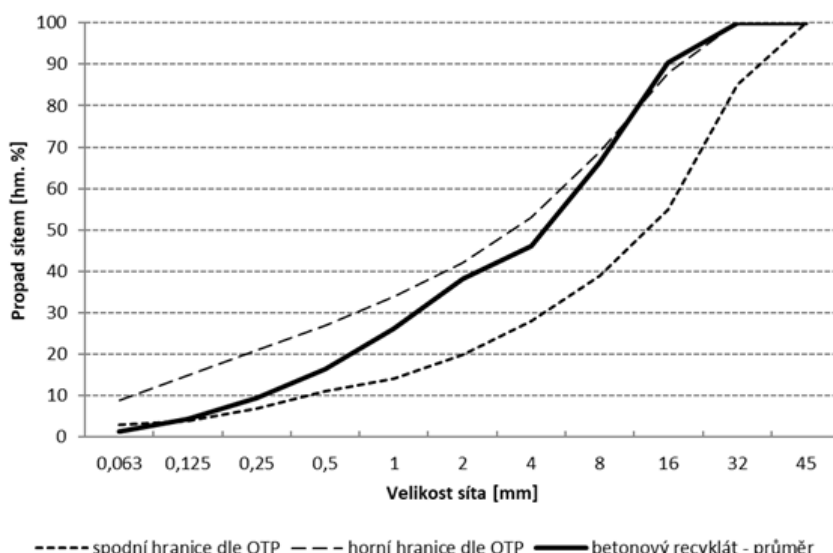
V oblasti železničního stavitelství jsou recyklované materiály používány ve velkých objemech již několik desítek let. Hlavní materiálem určeným k recyklaci je "staré" kolejové lože tvořené znečištěným drceným kamenivem frakce 32/63 mm. Pro recyklaci kolejového lože je zavedena základní předpisová základna, která podrobně specifikuje jak technické, tak ekologické požadavky. V obecné rovině se v praxi uplatňují dva postupy recyklace nazývané "výroba recyklovaného kameniva frakce 32/63 mm pro kolejové lože" a "výroba recyklované šterkodrti" frakce 0/32 mm pro použití v konstrukčních a podkladních vrstvách. Využití recyklátu ze "starého kolejového lože" do konstrukčních vrstev z pohledu legislativy je řešeno předpisem ČD S4 z roku 1998<sup>21</sup>. Obecně předpis S4, mimo výše uvedenou problematiku recyklace "starého" kolejového lože, umožňuje využití druhotných materiálů, tedy teoreticky i SDO, do zemního tělesa. Podrobněji předpis S4 definuje použití recyklovaného kameniva do zásypů odvodňovacích zařízení, výplní gabionů a minerálních směsí (jako dílčí složku)<sup>22</sup>.

Jednou z možností je SDO vzniklý z betonových pražců. Betonové pražce se na železničních tratích v Československu začaly používat v 50. letech 20. století. V současné době tvoří převážnou většinu pražců, které jsou uloženy v kolejích spravovaných Správou železnic, s.o. (SŽ). Jejich přibližný počet se pohybuje v rozmezí 15 až 20 milionů kusů. Již v současné době je třeba zabývat se otázkou, jak naložit s dále nepoužitelnými pražci. Jednou z možností je jejich drcení na betonový recyklát, který by mohl být použit jako náhrada přírodního kameniva (např. šterkodrti) v konstrukci pražcového podloží. Recyklát vzniklý drcením výhradně železničních pražců z vysokopevnostního betonu se vyznačuje oproti ostatním recyklátům typu SDO vysokou kvalitou a homogenitou. V současné době se vyřazené betonové pražce používají do kolejí nižších řádů nebo jako konstrukční prvky ochranných a záchytných zdí<sup>23</sup>.

V rámci výzkumu na Katedře železničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze byly provedeny analýzy pro určení vhodnosti použití betonového recyklátu z pražců v pražcovém podloží. Požadavky na vlastnosti betonového recyklátu byly ztotožněny s požadavky uvedenými v předpisu OTP pro frakce 0/32 mm<sup>24</sup>. Z tohoto rozsáhlého předpisu byly pro porovnání vlastností betonového recyklátu a šterkodrtě vybrány tyto důležité vlastnosti: zrnitost dle ČSN EN 933-1<sup>25</sup>, otlukovost LA dle ČSN EN 1097-2<sup>26</sup>, mrazuvzdornost dle ČSN EN 1367-1<sup>27</sup> a objemová hmotnost dle ČSN EN 13286-2<sup>28</sup>.

V rámci zkoušky zrnitosti byla stanovena průměrná křivka zrnitosti. Výsledky jsou graficky uvedeny na obrázku 1. Vyrobený betonový recyklát částečně nevyhověl požadavkům předpisu OTP. Zkouška otlukovosti LA byla provedena na třech vzorcích betonového recyklátu frakce 8/32 mm o hmotnosti 5000 g. Pro zkoušku byla použita sada 11 koulí a počet otáček bubnu byl 500 ot/min. Jednotlivé vzorky dosáhly součinitele LA = 22, 24 a 23. Vyrobený betonový recyklát tak vyhověl požadavkům předpisu OTP na otlukovost LA (max. 50). Zkouška mrazuvzdornosti byla provedena na betonovém recyklátu frakce 8/16 mm o hmotnosti 6000 g. Vzorek byl rozdělen na tři dílčí vzorky s hmotností 2000 g. Celkem bylo provedeno 10 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Nejnižší teplota při zmrazovacím cyklu byla minus 20 °C. Po provedení zmrazovacích cyklů byl stanoven průměrný úbytek hmotnosti dílčích vzorků na síť 4 mm. Průměrný úbytek hmotnosti dosáhl hodnoty 2,91 %. Vyrobený betonový recyklát tak vyhověl požadavkům předpisu OTP na mrazuvzdornost, který určuje limitní hodnotu 4 %. Objemová hmotnost betonového recyklátu frakce 0/32 mm byla stanovena metodou Proctorovy modifikované zkoušky. Byl použit hmoždíř typu B a pěch o hmotnosti 4,5 kg. Byla dosažena maximální suchá objemová hmotnost betonového recyklátu 1870 kg/m<sup>3</sup> při optimální vlhkosti 8,5 hm. %.

Na laboratorní zkoušky navázalo experimentální měření v měřítku 1:1 se zaměřením na stanovení optimální vlhkosti konstrukční vrstvy z betonového recyklátu ve vztahu k únosnosti povrchu konstrukční vrstvy, vývoj nárůstu únosnosti v čase v důsledku sekundárního působení cementové složky recyklátu a chování konstrukce během cyklického zatěžování<sup>29</sup>.



**Obrázek 1: Průměrná křivka zrnitosti vyrobeného betonového recyklátu frakce 0/32.**

Z provedeného experimentu bylo zjištěno, že po přimíchání záměsové vody do směsi betonového granulátu frakce 0/32 mm dochází ke spuštění sekundární reakce cementové složky recyklátu, která se projevuje zvyšováním únosnosti konstrukční vrstvy v čase, přičemž k nejvýraznějšímu nárůstu dochází během prvních 24 hodin a po 7 dnech je již únosnost takřka ustálená. Nejvyšší únosnosti konstrukční vrstvy z betonového recyklátu bylo dosaženo při vlhkosti směsi 8,4 %, což odpovídá optimální vlhkosti recyklátu pro dosažení jeho maximální objemové hmotnosti. U betonového granulátu s vlhkostí 8,4 % byl zjištěn nárůst statického modulu přetvárnosti povrchu konstrukční vrstvy během 7 dní o takřka 200 %, přičemž bylo dosaženo konečné hodnoty statického modulu přetvárnosti více než 100 MPa. Konstrukce s konstrukční vrstvou z pražcového recyklátu frakce 0/32 mm o tloušťce 15 cm v průběhu cyklického zatěžování v rozsahu 250 000 zatěžovacích cyklů prokázala velmi dobré schopnosti odolávat tomuto zatížení, povrch konstrukční vrstvy byl kompaktní bez zjevných trhlin či jiných závad. Na konstrukční vrstvě uložené na zemní pláni o únosnosti cca 13 MPa bylo po 10 dnech zrání a konsolidace dosaženo statického modulu deformace více než 40 MPa, což vyhovuje aktuálnímu požadavku předpisu SŽ S4 Železniční spodek pro koleje s rychlostí do 120 km/h a provozním zatížením do 2 mil. hrt/rok. Po provedení cyklického zatěžování v rozsahu 250 000 zatěžovacích cyklů byl zaznamenán trvalý pokles pražce 4,3 mm a pružný pokles pražce při zatížení od 0 do 42 kN 0,54 mm.

### **Využití SDO v silničním stavitelství**

V silničním stavitelství využití SDO obecně upravují technické podmínky TP 210. Minerální odpad z demolic či dekonstrukcí staveb se obecně může využívat do zemního tělesa silniční stavby, podloží vozovek a konstrukčních vrstev pozemních komunikací, dopravních a manipulačních ploch. Pokud se jedná o využití jako zrnitého materiálu nebo náhrady přírodního kameniva v podobě recyklovaného kameniva, tak platí soubor několika norem, které musí SDO splnit. Jedná se o harmonizované normy ČSN EN 13 242+A1, ČSN EN 13 043 a ČSN EN 12 620, v případě, kdy SDO je využit jako náhrada zeminy v podloží silniční stavby nebo při výstavbě zemního tělesa, tak musí tento materiál splnit ČSN 73 6133. Obecně tedy z uvedeného plyne, že využití stavebně-demoličního odpadu je možné pouze tehdy, pokud dojde k přeměně tohoto materiálu na recyklát, v případě uplatnění do konstrukčních vrstev potom musí být odpad přeměněn na recyklované kamenivo a musí být splněny požadavky, které se pro recyklované kamenivo standardně předepisují. Použití či umístění SDO v podobě odpadu silniční stavební praxe v podstatě neakceptuje. Technické podmínky TP 210 v tomto ohledu slouží pro stanovení požadavků na využívání recyklovaného stavebního materiálu (RSM), což lze chápat jako předstupeň recyklovaného kameniva. RSM je přitom definovaný jako materiálový výstup ze zařízení k využívání a úpravě SDO, kategorie ostatní odpad, nebo odpadů podobných SDO, spočívající ve změně zrnitosti a jeho roztřídění na velikostní frakce v zařízeních k tomu určených. Zde se tedy jediným

požadavkem stává zrnitost materiálu. RSM se dle TP 210 rozlišuje na recyklát z betonu, recyklát ze zdiva, recyklát směsný, recyklát z vozovek, recyklát asfaltový a jako specifická kategorie pak slouží ještě R-materiál (tabulka 5). Ten má v podstatě požadavky nejvíce propracované. Pro R-materiál, který představuje upravený asfaltový recyklát, totiž mnoho let platí neharmonizovaná ČSN EN 13108-8, která stanovuje jednotná doporučující technická pravidla v rámci Evropy, jak s tímto materiálem pracovat.

V České republice s ohledem k rostoucí snaze posledních let R-materiál využívat ve zvýšené míře jako náhradu přírodního kameniva v asfaltových směsích a díky zavedení vyhlášky č. 130/2019 byla na přelomu let 2020/21 implementována nová technická norma ČSN 73 6141, která zpřesňuje požadavky, jak s R-materiálem nakládat a jak jej správně využívat v asfaltových směsích, aby bylo možné maximalizovat jeho využití a byly přitom garantovány výkonové požadavky vlastní asfaltové směsi. Tedy zjednodušeně řečeno, je-li to výrobovými normami pro asfaltové směsi umožněno, tak u výsledného výrobku je jedno, zda obsahuje jen přírodní kamenivo nebo 30 % hm. či 60 % hm. R-materiálu, vždy musí být splněny a garantovány stejné vlastnosti směsi a stejná kvalita. Environmentální parametry jsou přitom hlídány uvedenou vyhláškou, která stanoví, kdy může asfaltový recyklát (přesněji znovuzískaná asfaltová směs) být klasifikován jako vedlejší produkt, aniž by vstupoval do odpadového režimu, kdy lze u odpadu pro takový materiál docílit stavu konce odpadu a kdy naopak je nezbytné jej vést jako ostatní nebo dokonce nebezpečný odpad. Nicméně i v těchto případech existují možnosti jeho využití. Pokud u odpadu nejsou překročeny meze sumy sledovaných PAU, potom lze odpad zapracovat do asfaltové směsi a environmentální parametry je třeba ověřit u vyrobené směsi.

Druhou možností, kdy víme, že v konstrukci vozovky určené k rekonstrukci je nebezpečný materiál (ve smyslu koncentrace PAU), lze v souladu s technickými podmínkami TP 150 využít technologii recyklace za studena na místě, kdy se materiál recyklérem (upravená zemní fréza) smíchá s asfaltovou emulzí či zpěněným asfaltem a obalením zrn nebezpečného materiálu asfaltovým filmem dojde k pasivaci účinku PAU z hlediska jejich potenciálního uvolnění do životního prostředí. Technologie recyklace za studena se přitom v ČR využívá úspěšně od konce 90. let, protože v rámci silniční sítě zhruba ve 30 % všech vozovek byla v minulosti použita i dehtová pojiva. Dehet je podobnou látkou, která se na rozdíl od ropného asfaltu vyznačuje mnohanásobně vyššími koncentracemi sledovaných PAU. Pokud je v asfaltových vrstvách použit či se používá ropný asfalt, lze ve vzorku takového kompozitu jen s těžší překročit hranici 25 mg/kg sušiny pro 16 sledovaných PAU.

V oblasti uplatňování asfaltového recyklátu (přesněji R-materiálu) je dnes snahou docílit postupného navýšení přípustného podílu tohoto materiálu v asfaltové směsi. Standardně výrobové normy jako ČSN 73 6121 připouštějí v závislosti na typu asfaltové směsi 15 – 50 % využití R-materiálu. Jsou samozřejmě některé typy směsí, kde to není umožněno, protože přetříděním a předrcením asfaltového recyklátu není možné docílit takové homogenity výsledného materiálu, který by splnil náročné požadavky směsi. To se týká například mastixových koberců nebo jemnozrnných asfaltových směsí. Cílem připravované revize uvedené normy je přitom tyto meze zvýšit na 30 – 70 % R-materiálu, přičemž tento materiál v asfaltové směsi potom nenahrazuje jen kamenivo, ale i asfaltové pojivo. To je jedna z předností tohoto typu stavebního recyklátu – umožňuje uplatnit tzv. upcycling, kdy se využívá nejen minerální složka, ale původní pojivo se opětovně reaktivuje jako pojivo.

Využití recyklátu z betonu je z hlediska uplatnění v cementobetonovém (CB) krytu vozovky omezeno pouze na zdroj, který pochází z demolic původní betonové vozovky. V souladu s ČSN 73 6123-1 v současnosti nelze použít betonový recyklát z jiného typu konstrukcí. Navíc musí recyklát s CB krytu splnit technické požadavky vymezené přílohou C normy, kde se kromě jiného stanoví klasifikace hrubých zrn ( $R_{c90}$ ), maximální obsah jemných částic ( $f_{1,5}$ ) a bezpečnost z hlediska alkalicko-křemičité reakce (recyklát nesmí obsahovat reaktivní kamenivo a musí být vyvážen obsah alkálií v nově vyráběném betonu). Pokud k využití recyklátu z betonu dochází, potom se uplatní ve spodních vrstvách CB krytu, a to zpravidla do množství 30 % hm. Pro horní vrstvu, která dle současné zavedené praxe je navrhována jako vymývaný (vymetáný) beton momentálně použití recyklovaného kameniva není možné. Reálné zkušenosti však ukazují, že míra využití betonového recyklátu je u realizovaných staveb menší. Při modernizaci dálnice D1 docházelo k uplatnění betonového recyklátu v značně omezeném rozsahu. Materiál vzniklý vybouráním původních betonových desek byl po předrcení využíván v rámci nestmelených vrstev nebo při rozšiřování zemního tělesa dálnice a jako recyklované kamenivo.

**Tabulka 5: Doporučená užití RSM v silničních stavbách (dle TP 210).**

| Typ RSM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Použití v silniční stavbě |         |                             |                 |                 |         |                           |                            |         |                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------|---------------------------|----------------------------|---------|-------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | AV                        | CB      | Nestmelené podkladní vrstvy |                 |                 |         | Stmelené podkladní vrstvy | Prolévané podkladní vrstvy |         | Podloží, zemní těleso <sup>1)</sup> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                           |         | MZK                         | ŠD <sub>A</sub> | ŠD <sub>B</sub> | MZ      |                           | kostra                     | výplň   |                                     |
| Recyklát z betonu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ano                       | p / ne  | ano                         | ano             | ano             | p / ano | ano                       | p / ano                    |         |                                     |
| Recyklát ze zdiva                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ne                        | ne      | ne                          | p / ne          | ano             | p / ano | ano                       | p / ne                     | p / ano | ano                                 |
| Recyklát směsný                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ne                        | ne      | ne                          | ne              | ne              | ano     | ano                       | ne                         | ano     | ano                                 |
| Recyklát z vozovek                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | ano                       | p / ano | ano                         | ano             | ano             | p / ano | ano                       | p / ano                    |         |                                     |
| Recyklát asfaltový                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | ano                       | ne      | p / ano                     | ano             | ano             | p / ne  | ano                       | p / ne                     |         |                                     |
| <p>Vysvětlivky:</p> <p>p: podmíněčně použitelný (omezené např. z technologických, ekonomických nebo environmentálních důvodů)</p> <p>AV: asfaltové vrstvy vozovek pozemních komunikací; CB: cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací.</p> <p><sup>1)</sup> Zrnitý materiál do podloží vozovek, vrstevnatých násypů (ztužující vrstva), případně nezpevněných krajnic vozovky pozemních komunikací</p> |                           |         |                             |                 |                 |         |                           |                            |         |                                     |

Z hlediska podkladních vrstev vozovek je betonový recyklát efektivně využitelný ve směších stmelených hydraulickými pojivy a při vhodné zrnitosti bude dobře sloužit jako alternativa štěrkodrti. V těchto případech může docházet k velmi dobré náhradě přírodního kameniva. Náročnější bývá jeho uplatnění v technologii mechanicky zpevněného kameniva, kde jsou dané přísnější požadavky na zrnitost a současně by mělo být omezeno i drcení větších zrn. Betonový recyklát je uplatnitelný i pro některé typy asfaltových směsí. Pro tyto účely se ale fakticky nevyužívá, protože silniční stavitelství má značné přebytky asfaltového recyklátu a není zde proto silná poptávka po jiném typu recyklovaného kameniva.

Z pohledu silničního stavitelství specifickým typem jsou recykláty ze zdiva a směsné recykláty SDO, které vznikají jako vícesložkové. Pro klasické konstrukce pozemních komunikací (dálnice, silnice I. – III. třídy) se buď nevyužívají vůbec, nebo velmi sporadicky. Jedním z důvodů, především u konstrukčních vrstev, je jejich zhoršená odolnost proti namrzavosti, která je dána přítomností cihel nebo plynosilikátů. Konstrukce vozovky vždy bude vystavena účinkům vody a v zimním období potom kombinovanému účinku vody a mrazu. Tato skutečnost při přirozeně cyklickém působení, kterému nelze nijak efektivně zabránit, vede k postupnému rozpadu cihelných částic, což ohrožuje následně soudržnost celé konstrukční vrstvy. Při teoretickém využití v asfaltové směsi potom cihelné či plynosilikátové částice nemají dostatečné parametry odolnosti proti otluku a současně díky své struktuře nasákají více asfaltového pojiva. Z výše uvedených důvodů je tak možné tento materiál využít: (a) jako podkladní vrstvy z hlediska zatížení nevýznamných dopravních ploch, (b) jako materiál pro zemní tělesa, kde může tvořit například jádro násypů – zejména směsný recyklát je využitelný v aktivní zóně pozemní komunikace jako náhrada nevhodných zemin či jako materiál pro mechanickou úpravu méně vhodné zeminy, nebo (c) jako materiál, který bude vhodně uplatněn pro hydraulicky stmelené směsi, jež se využijí u vozovek nižších kategorií.

## Závěry

V rámci projektu TA ČR program Prostředí pro život č. SS03010302 s názvem "Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití" budou hledány vhodné nástroje, které umožní efektivní využití SDO. Z přehledu použitého v článku vyplývá, že je nutné a vhodné modifikovat a upravit současnou legislativu, aby byly vhodné nástroje efektivně využity a již před vlastním provedením demolice bylo možné efektivně rozhodnout o způsobu využití recyklátu, resp. recyklátů, které konkrétní objekt "může" vygenerovat. Zároveň je nutné následně efektivně využít současné technologie nebo najít další nové pro efektivní zpracování SDO a přeměnit ho na surovinu.

Na ČVUT v Praze jsou vyvíjeny nové metody a přístupy k opětovnému využití SDO ve stavebnictví, několik příkladů je součástí článku. Ve většině případů se jedná o řešení, která jsou dále zdokonalována s ohledem na efektivní využití upraveného recyklátu. Abychom mohli aplikovat laboratorně ověřené zkušenosti v praxi, musíme podrobně znát původ recyklovatelných zdrojů. Právě původ odpadu je parametr, který výrazně ztěžuje další postup recyklace a v případě výkupu SDO z různých zdrojů je využitelnost takového odpadu výrazně omezená. Abychom zefektivnili využití SDO, je nutné zavádět metodiku, která bude odpad vnímat jako zdroj.

## Poděkování

*Tento příspěvek byl připraven díky podpoře TA ČR program Prostředí pro život č. SS03010302 s názvem "Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití". Podrobnější informace k projektu jsou dostupné na adrese <https://decompose.fsv.cvut.cz/>.*

## Literatura

1. ČSN EN 206+A1: *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda* (duben 2018).
2. Topič J., Prošek Z.: *Acta Polytech.* **57**, 49 (2017).
3. Prošek Z., Trejbal J., Nežerka V., Goliáš V., Faltus M., Tesárek P.: *Resour., Conserv. Recycl.* **155**, 104640 (2020)
4. Prošek Z., Nežerka V., Hlůžek R., Trejbal J., Tesárek P., Karra'a G.: *Constr. Build. Mater.* **201**, 702 (2019).
5. ČSN EN 480-1: *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 1: Referenční beton a referenční malta pro zkoušen* (duben 2015).
6. Sičáková A., Špak M.: *Materials* **12**, 3421 (2019).
7. Ma C. K., Awang A. Z., Omar W.: *Constr. Build. Mater.* **1486**, 90 (2018).
8. Juenger M. C., Snellings R., Bernal S. A.: *Cem. Concr. Res.* **122**, 257 (2019).
9. Dhandapani Y., Sakthivel T., Santhanam M., Gettu R., Pillai R. G.: *Cem. Concr. Res.* **107**, 136 (2018).
10. Dureje J., Prošek Z.: *Proceedings of NMM 2019 Nano & Macro Mechanics* (Padevět P.), str. 19. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, Praha 2020.
11. ČSN EN 12620+A1: *Kamenivo do betonu* (prosinec 2008).
12. ČSN EN 933-11: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva* (říjen 2009).
13. Pavlů T., Šefflová M.: *Proceedings of Recycling 2014* (Škopán M.), str. 11. VUT Brno, Brno 2014.
14. Katz A.: *Cem. Concr. Res.* **33**, 703 (2003).
15. Debieb F., Kenai S.: *Constr. Build. Mater.* **22**, 886 (2008).
16. Cachim P.B.: *Constr. Build. Mater.* **23**, 1292 (2009).
17. Yang J., Du Q., Bao Y.: *Constr. Build. Mater.* **25**, 1935 (2011).

18. Uddin M. T., Mahmood A. H., Kamal M. R. I., Yashin S. M., Zihan Z. U. A.: Constr. Build. Mater. **134**, 713 (2017).
19. Pavlů T., Šefflová M.: *Proceedings of 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis* (Polach P.), str. 411. Czech Society for Mechanics, Praha 2014.
20. Pavlů T.: *Disertační práce*. ČVUT v Praze, Praha 2015.
21. Předpis České dráhy S4 *Železniční spodek*. č.j. 60 941/97-S13 (červenec 1998).
22. Předpis Správa železnic S4 *Železniční spodek*. č.j. 76 496/2020-SŽ-GŘ-O13 (leden 2021).
23. Šablatura J.: *Bakalářská práce*. ČVUT v Praze, Praha 2010.
24. OTP 25 640/06- OP *Obecné technické podmínky pro štěrkopísek, štěrkodrt' a recyklovanou štěrkodrt' pro konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku* (2006).
25. ČSN EN 933-1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor* (červenec 2012).
26. ČSN EN 1097-2: *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení* (duben 2021).
27. ČSN EN 1367-1: *Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování* (prosinec 2007).
28. ČSN EN 13286-2: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška* (duben 2011).
29. Šablatura J.: *Diplomová práce*. ČVUT v Praze, Praha 2012.

## Current possibilities of increasing the use of construction and demolition waste in construction

**Zdeněk PROŠEK<sup>a</sup>, Tereza PAVLŮ<sup>b</sup>, Milan RYDVAL<sup>c</sup>, Jan VALENTIN<sup>a</sup>, Martin LIDMILA<sup>a</sup>, George KARRA´A<sup>d</sup>, Jiří PODOLSKÝ<sup>e</sup>, Jan FOLTÝN<sup>f</sup>, Pavel TESÁREK<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Czech Republic;

<sup>b</sup> České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, Třínečká 1024, 273 43 Buštěhrad, Czech Republic;

<sup>c</sup> České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 160 00 Praha 6-Dejvice, Czech Republic;

<sup>d</sup> Lavaris, s.r.o., Areál Šroubáren 43, 252 66 Libčice nad Vltavou, Czech Republic;

<sup>e</sup> Moravostav Brno, a.s., Maříkova 1899/1, 621 00, Brno-Řečkovice, Czech Republic;

<sup>f</sup> Tomáš STRAUB, s.r.o., Ostravská 1847, 748 01 Hlučín, Czech Republic

### Summary

The presented article is focused on current trends in construction, which are associated with the use of construction and demolition waste, again in construction, both in building construction and in transport infrastructure. In accordance with the principles of sustainable development, other modern and promising ways are being sought for the efficient use of construction and demolition waste. The worldwide effort is to use as much waste as possible and to minimize, ideally ban landfilling altogether. The article presents new possibilities with further potential and presents examples of experimental research conducted at the Czech Technical University in Prague in the last few years. Specifically, partial results from four different studies are presented.

**Keywords:** construction demolition waste, recycling, building constructions, transport infrastructure.

# Study of changes in surface properties of zeolite due to modifications

**Lucia DOMARACKÁ, Marcela TAUŠOVÁ, Ladislav HVIZDÁK, Pavol RYBÁR, Mária DREVKOVÁ**

*Institute of Earth Resources, Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies Technical University of Košice, Letná 9, Košice, Slovakia  
e-mail: lucia.domaracka@tuke.sk, marcela.tausova @tuke.sk,  
ladislav.hvizdak@tuke.sk, pavol.rybar@tuke.sk*

## Abstract

*Zeolites are a mineral resource that is widely used mainly due to their specific properties. In the article, we investigated how the properties change - the internal capacity of zeolites under certain specific conditions, such as temperature change, time changes helium purification. All measurements of zeolite specific surfaces were performed on a Micromeritics Gemini VII - surface area and porosity analyzers.*

*The samples were measured (dust, various fractions, pellets) at various conditions: temperatures helium-purified (He), time changes.*

*The input and output parameters of the individual experimental samples were evaluated using descriptive statistics. All measured data were then analyzed by multidimensional ANOVA analysis and analysis, with our ambition to identify and quantify the dependence of the individual specimen treatments on the total output - measured values of the weight of the evaporated water, specific surface.*

*The results at the end are divided into small or insignificant influence of changes in other monitored parameters and on significant effects of parameters on the resulting parameters.*

*Small or insignificant influence of changes was stated by the amount of the water evaporated from the zeolite with respect to the time of heating of the samples prior to the evaluation of the zeolite specific surface. Similar conclusions can we come from the analysis of results where the different heating temperatures of zeolite samples were compared before determining their specific surfaces and the amount of evaporated water from the samples.*

*Significant effects of parameters on the resulting parameters: the different sampling times in their preparation for measuring the specific surfaces of the investigated zeolite samples significantly affect the measured specific surfaces. The weight of evaporated water is strongly dependent on the type of treatment - the values are significantly higher due to the effects of helium and vacuum.*

**Key words:** *zeolite, samples of zeolites, specific surface, ANOVA, numerical analyses, industrial rocks, temperature, helium, time*

## 1. Introduction

Introduction in the current environmental problems with maintaining the purity and health acceptability of ingredients environment for nature and mankind, the modification of natural ones comes to the fore ion exchange materials to use them especially in cleaning or purification of various types of wastewater, including radioactive. By chemical treatment, zeolites acquire new, original properties, e.g. their surface increases, the sorption capacity increases, the physicochemical and mechanical ones improve properties, etc. For the chemical modification of zeolites, ion exchange is usually used, in which the zeolite is used to transform into a mono-cationic form, e.g. Na-zeolite, K-zeolite, etc. solutions of salts, hydroxides, or acids <sup>6</sup>.

Zeolite is a natural volcanic rock with unique physical properties. The uniqueness of zeolite is based on its extraordinary crystal structure, which enables it to capture substances in all: solid, liquid and gas states. Compositionally, zeolites are similar to clay minerals. More specifically, both are aluminosilicates. They differ, however, in their crystalline structure. Zeolites have a rigid, 3-dimensional crystalline structure (similar to a honeycomb) consisting of a network of interconnected tunnels and cages. The total volume of the cavity, also called porosity, is of 24 – 32%. Specific weight is around 2,200 – 2,440 kg.m<sup>-3</sup>, absorbability of used samples was as much as 39%. The properties of the zeolite come from its specific crystal structure. Special aspect of this structure is, that the pore and channel sizes are nearly uniform, allowing the crystal to act as a molecular sieve<sup>1, 2</sup>.

The tetrahedrons in space form a crystal lattice which differs from other types of similar lattices in that their cavities are interconnected by some channels which have an exact, always the same diameter for a given type of zeolite. The diameters of the channels of the natural zeolites of the collet from 0.2 nm to 0.7 nm form a micro-porous structure in which the volume and channels reach up to 50% of the total volume<sup>3</sup>.

These cavities and channels contain weakly bound water. Its amount is variable and depends on the chemical zeolite, the size of the channels and cavities as well as the external PCH e.g. temperature, the voltage of water vapor in the surrounding environment, and careful heating, this so-called zeolite water can be gradually removed from the grid without disturbing the mineral structure. The removed water can be re-absorbed by the mineral in the original amount, or in the absence of water it can be replaced by molecules of other substances (e.g. ammonia, ethyl alcohol, Hg, hydrogen sulfide, etc.) However only substances with a diameter less than or equal to such as the diameter of the inlet openings to the channels. Thus it is possible to separate e.g. argon from oxygen or molecules of paraffin with the same chain from paraffin branched - chained and the like. Thus, zeolites function as sieves or filters, by means of which we can selectively separate, "sieve" a certain type of molecules<sup>4</sup>.

In the Slovak Republic rock-forming zeolites represented by clinoptilolite, mordenite, and analcemia are found at the edge East Slovak Neogene basin between the villages of Vranov, Kučín, Nižný Hrabovec, Majerovce and Pusté Čemerné<sup>5</sup>.

Slovak zeolite from Nižný Hrabovec is gray-green and contains 40 – 70% clinoptilolite, 8 – 10% feldspar, 6 – 10% cristobalite, 2 – 5% quartz, and 13 – 30% volcanic glass. The primary cation in Slovak natural zeolite is potassium in other types it can be sodium, calcium, magnesium, iron, and volcanic glass. The Si / Al ratio for Slovak clinoptilolite ranges from 3.4 to 5.2. Zeolites clinoptilolite-type retain their structure over a wide pH range, from 1.0 to 11.5 and they are radiation stable to the generally stated absorbed radiation dose 107 Gy (gray). Slovak zeolite with primary cation K has very good thermal properties, withstands temperatures up to 600 °C without change<sup>15</sup>.

## 2. Literature review

The short review from literature was done, below are results. With Physical Adsorption Characterization of Mesoporous Zeolites deals authors, Thommes, M., Guillet-Nicolas, R., Cychosz, K.A.<sup>6</sup> The authors of the book deal with the most important aspects of gas adsorption on the textural and structural internal structure of zeolites. The experiments were focused on the precise steps necessary to obtain accurate adsorption data and describe a detailed understanding of the basic adsorption mechanisms in surface and pores analysis. The BET (Brunauer, Emmett, and Teller) method is used to characterize the physical adsorption at surface evaluation. A more reliable analysis of the pore size of these materials is the method of Density functional theory (DFT)<sup>6</sup>.

Lecloux, A.J et al., discuss specific surface area. The specific surface analysis was used as a screening tool for the classification and identification of nanomaterials. The results are compared on particles with dimensions less than 100 nm. The research concludes that the experimental values of the analysis allow the identification of nanomaterials without any inaccurate negative identification (subject to certain conditions - particle size, relative pressure range, qualitative particle image). The proposed analysis model can be used to look for the potential effects of shape and size change for different nanoforms<sup>7</sup>.

An experimental study is focused on a new zeolite modification method (ZBHCM type) with an  $\text{NH}_4\text{Cl}$  solution and develops a new zeolite-based moisture control material. The type of zeolite for the study is determined by the morphological and physical characteristics of this material. Based on the experiments performed, it is proved that zeolite has an effect on the internal temperature and a significant influence on the humidity of the interior. These varies depending on the amount of zeolite used, with the issue deals Zhou, B et al. in the Experimental article study on moisture migration process of zeolite-based composite humidity control material<sup>8</sup>.

The research used the efficiency of MFIs, namely their synthesis by hydrothermal method. Subsequently, the results were evaluated by TGA analysis and BET analysis (coke storage utilization) for coke detection on MFI nanoparticles<sup>9</sup>.

The use of natural zeolites for environmental applications is gaining new research interests mainly due to their properties and significant worldwide occurrence. The present work describes the characterization of a natural Chilean zeolite and the results as adsorbent for ammonia from aqueous solutions. The zeolite-rich tuff sample, mainly composed of clinoptilolite and mordenite, consisted of 13  $\mu\text{m}$  mean volumetric particle diameter, 55  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (methylene blue adsorption) and 177  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (nitrogen adsorption) of specific surface area. Particles were negatively charged over a broad pH range (with or without ammonia) and 1.02 meq  $\text{NH}_4^+ \text{g}^{-1}$  cation-exchange capacity. The ammonia removal appears to proceed through ion-exchange and rapid kinetics (rate constant of 0.3  $\text{min}^{-1}$ ) at neutral pH value, with removal capacities up to 0.68 meq  $\text{NH}_4^+ \text{g}^{-1}$ . The Langmuir isotherm model provided excellent equilibrium data fitting ( $R^2=0.97$ ). Results indicate a significant potential for the Chilean natural zeolite as an adsorbent/ion-exchange material for wastewater treatment and water reuse applications<sup>10</sup>.

Földesová, M., Hudec, P. made study of surfaces of natural and chemically modified zeolites of clinoptilolite type by physical adsorption of nitrogen at the temperature of liquid nitrogen by the volumetric method was done on Slovak zeolite clinoptilolite with very good results<sup>15</sup>.

### 3. Experiment and equipment

#### 3.1 Equipment Gemini VII - measurement of specific surface

Before measuring the internal surfaces on zeolite samples (dust, various fractions, pellets), they were subjected to various drying, helium-purified and vacuum processes, under defined conditions – temperatures in a range of 120 – 300 °C respectively, and time from 0.5 to 2 hours.

Precise measurements of the internal zeolite structure can be carried out using the Micromeritics Gemini VII Surface Area and Porosity Analyzers (See the picture Figure 1). The device works on principles of material analyses and reliably produces accurate results on the surface but also in the internal pores of the measured material. The device reliably and repeatedly focuses on the total pore volume (not only surface) material and distributes the data directly through outputs to the digital form for further processing. The unique ability of the device is to analyze not only the surface of the material under investigation but also its internal specific surfaces (porous spaces in the specific structure)<sup>12,13</sup>. The device can avoid some source mistakes associated with traditional static volume instruments by rejecting a common (general) mode. This feature provides much more accurate measurements. The device also includes software (Windows, Windows XP, or Windows Vista), that includes a video installation and verification system, including data processing and evaluation.



**Figure 1: Equipment Gemini VII Surface Area and Porosity Analyzers**

Specific device parameters:

The applicability: Surface area: From  $0.1 \text{ m}^2$  (full), from  $0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (specific),

Pore volume:  $4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Pressure measurements: Measured pressure range:  $0 - 950 \text{ mm Hg}$ , ( $0 - 126655,6 \text{ Pa}$ )

$P / P_0$  resolution:  $<10^{-4}$ ,

Relative pressure range:  $0 - 1.0 P / P_0$  (adsorption only),

Pressure resolution:  $<0.1 \text{ mmHg}$ , ( $13,332 \text{ Pa}$ )

Accuracy and linearity: more than  $\pm 0.5\%$ .

Environment: Temperature: Operating  $10 - 35^\circ \text{ C}$  ( $50 - 96^\circ \text{ F}$ ), room temperature  $0 - 50^\circ \text{ C}$  ( $32 - 122^\circ \text{ F}$ ),

Humidity:  $20\% - 80\%$  relative, not condensation.

Adsorption: Optimal for the use of liquid nitrogen - Nitrogen analysis. The device is used for non-corrosive adsorption of gases under certain pressure at room temperature (and higher). Other gases used: oxygen, argon, carbon dioxide, butane, methane, other hydrocarbons. The helium is needed.

Vacuum system: The vacuum source is  $20 \times 10^{-3} \text{ mm Hg}$  (even higher) than the supply device (it is recommended to connect the oil pair reduction device). The system includes an oil crossover device (as a preventive part of the device).

Sample tube:  $0.95 \text{ cm}$ , outside length  $15.5 \text{ cm}$ , internal volume:  $6.5 \text{ cm}^3$ , maximum sample volume in the tube is approximately  $2.0 \text{ cm}^3$ .

### **3.2 Device VacPrep 061 Degasser**

Sample drying takes place on the VacPrep 061 Degasser laboratory equipment, which is a surface monitoring device and pore structure analysis. VacPrep offers two methods for removing pollutants from samples such as - water vapor and adsorbed sample gases, to avoid interference with surface measurements. The device ensures minimization of sample contamination during transfer from the device to the output analysis. It markedly increases process reliability and accuracy of results. VacPrep allows the removal of contaminants by heating samples up to  $400^\circ \text{ C}$  using a vacuum system or flowing gas method, or a combination of both methods. The device includes six sample heating stations and six cooling stations. The temperature is set simply on the digital control panel located at the front of the device (See the picture Figure 2).



Figure 2: Equipment VacPrep 061 Degasser

## 4. Preparation of samples, measurement and analysis

### 4.1 Preparation of samples

All measurements of zeolite specific surfaces were performed on a Micromeritics Gemini VII - surface area and porosity analyzers.

The individual measurements differed from each other by the preparation of samples before the process of measuring specific surfaces, the drying times of the samples, the degrees of drying, the use of a vacuum system and the passage of helium through the sample varied.

The samples were measured (dust, various fractions, pellets) at various conditions: temperatures (120 ° C, 2 hours, 300 ° C, 0.5 hours, 300 ° C, 2 hours), helium-purified (He). Sample weight: 0.491g – 0.565g (before drying).

Samples of zeolites (of different grain size) were prepared at a precision of 0.01g on a metrological verified laboratory scale of the WTC 06 / B1 type before the drying process. The weight of each sample was as much as 0.491 – 0.539 g. The individual weight of each instrument tube is in the range 10.325 – 10.404 g (for this reason the weight of each tube was individually measured and matched to the weight of each prepared zeolite sample).

After measuring the sample weights, the samples proceeded to the drying process with the possibility of a vacuum and gas connection (helium) - individually used in all processes. Drying was carried out on VacPrep 061 Degasser at various temperatures (max 300° C when the crystalline lattice of the zeolite occurs). The drying time was from 0.5 to 2.0 hours. During the drying, the water present in the zeolite was evaporated from the samples. Following the drying process, the samples were again weighed to determine the amount of evaporated water (%)<sup>14</sup>.

The dried samples were then placed in a Gemini VII - Surface Area and Porosity instrument in the instrumentation tubes to measure their specific surface area ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ). Before the start of the measurement, the weight of the measured sample, the weight of the test tube and the sample density were entered into the software. Subsequently, the program started the measurement process and evaluated the results in the required format (text, graph - isotherms, table). The results were then analyzed and evaluated. Data were collected by the experiment. Values need to be adjusted for statistical analyzes in the JMP statistical software. Columns that gave a range of values and were perceived as categorical data were adjusted to the average values we achieved by a numeric indicator.

### 4.3 Numerical analysis

The input and output parameters of the individual experimental samples (See the picture Figure 3) were evaluated using descriptive statistics.

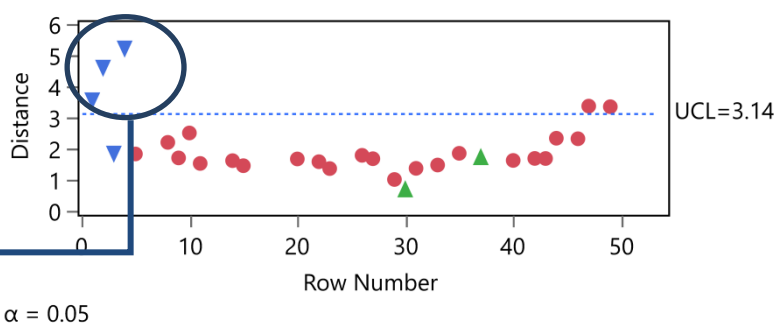
Samples with a fraction of 0.05 – 3 mm were included in the study, which was subsequently exposed to a temperature of 120 – 300 °C, with a heating time of 0.5 – 2.5 hours resp., in some cases the treated samples were exposed to He and Vac. With the samples thus prepared, the mass of evaporated water was measured in the range of 0.96 – 25.7% and the specific surface area in  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Where the values ranged from 19.78 – 40.36  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

### Multivariate Simple Statistics

| Column                                 | N  | DF    | Mean    | Std Dev | Sum     | Minimum | Maximum |
|----------------------------------------|----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| The grain sized - mean                 | 49 | 48.00 | 0.7936  | 0.7536  | 38.8600 | 0.0500  | 3.0000  |
| The heating °C                         | 53 | 52.00 | 241.887 | 83.1370 | 12820.0 | 120.000 | 300.000 |
| The time [hour]                        | 53 | 52.00 | 1.4528  | 0.7290  | 77.0000 | 0.5000  | 2.5000  |
| The weight of evaporated water [%]     | 35 | 34.00 | 6.3723  | 4.3069  | 244.217 | 0.9600  | 25.7000 |
| The inner surface [cm <sup>2</sup> /g] | 51 | 50.00 | 25.3650 | 3.4642  | 1295.01 | 19.7798 | 40.3362 |

Figure 3: Multivariate Simple statistics of inputs and outputs

The basic analysis has been found to be extensions - measurements that are significantly different from the average (See the picture Figure 4), they are samples of tiny fractions (dust) that were also exposed to all treatments (temperature He and Vac).



| The grain size [mm] | The grain size - mean | The heating °C | The time [hour] | Gas. He | Vac. | The weight of evaporated water [%] | The inner surface [cm <sup>2</sup> /g] |
|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------|---------|------|------------------------------------|----------------------------------------|
| <0.1                | 0.05                  | 120            | 2               | A       | A    | 8.35                               | 34.01                                  |
| <0.1                | 0.05                  | 300            | 2               | A       | A    | 19.06                              | 40.33                                  |
| 0.2                 | 0.2                   | 300            | 2               | A       | A    | 25.7                               | 28.01                                  |

Figure 4: Analysis of divergent values

All measured data were then analysed by multidimensional ANOVA analysis and analysis, with our ambition to identify and quantify the dependence of the individual specimen treatments on the total output - measured values of the weight of the evaporated water, specific surface.

#### 4.4 Analysis of multivariate

Multidimensional analysis of the dependencies of individual numerical variables is limited to examining columns characterizing inputs (fraction, heating temperature, heating time) and characterizing outputs (evaporated mass, the inner surface). The result of the analysis pointed to only a slight dependence (See the picture Figure 5):

- determining the entry conditions: (inverse relationships - lower temperatures have been allowed at lower temperatures and shorter at higher temperatures),
- the dependence of the outputs: (direct relationship - increasing the weight of evaporated water, increase the inner surface of the sample),

Input-Output Dependence: (the direct relationship between exposure time and inner surface sample), this dependence was subjected to further investigation using ANOVA analysis.

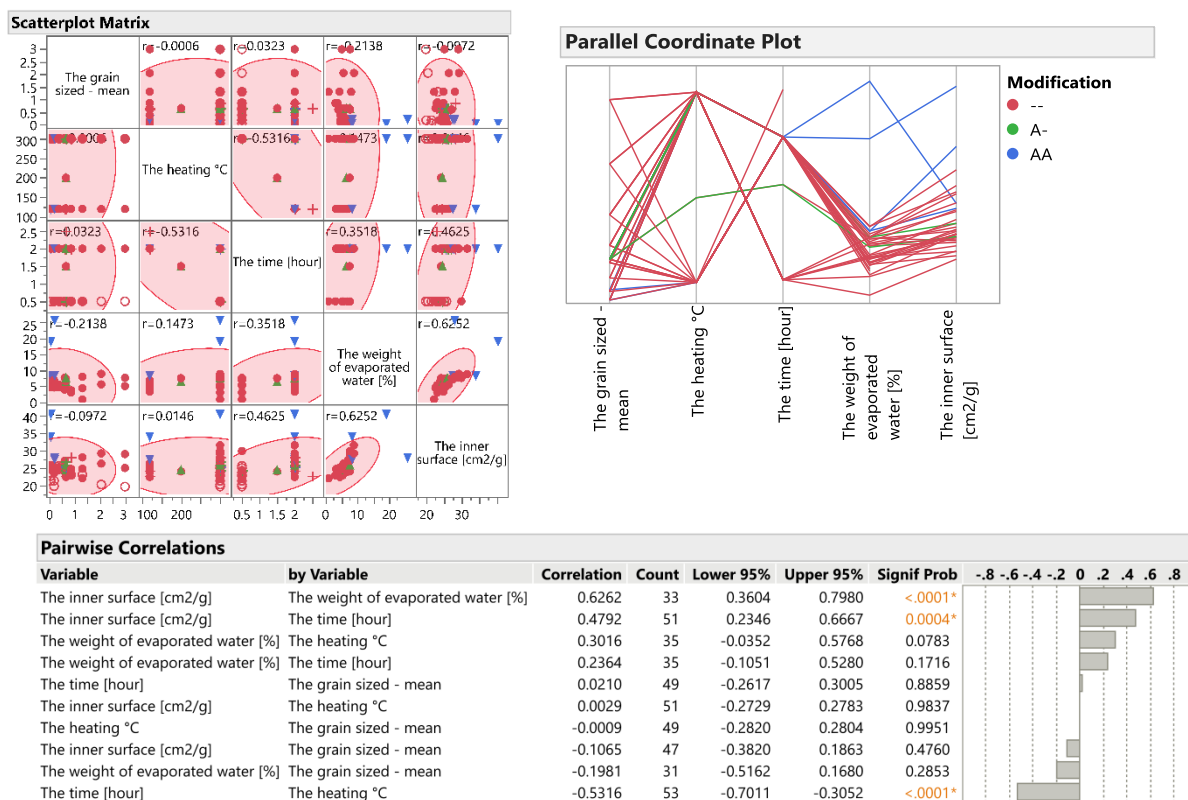


Figure 5: Multivariate analysis of numerical experiment data

#### 4.5 Analysis of ANOVA

Data were examined using the variability analysis principles, for the difference in outputs (evaporated water mass, the inner surface) of the treatment method, which was considered in this case as categorical data:

- A. Temperature time (0.5 / 1.5 / 2)
- B. Operating temperature (120/200/300)
- C. Type of additional adjustments (without additional modifications / He / Vac + He)

##### A. HEAT RATE TIME

The analysis of the measured sized - mean values of the mass of evaporated water about the different time of temperature has not shown statistically significant variability so that it can be argued, that the time does not play an important role in the effort to achieve higher values of evaporated water (See the picture Figure 6).

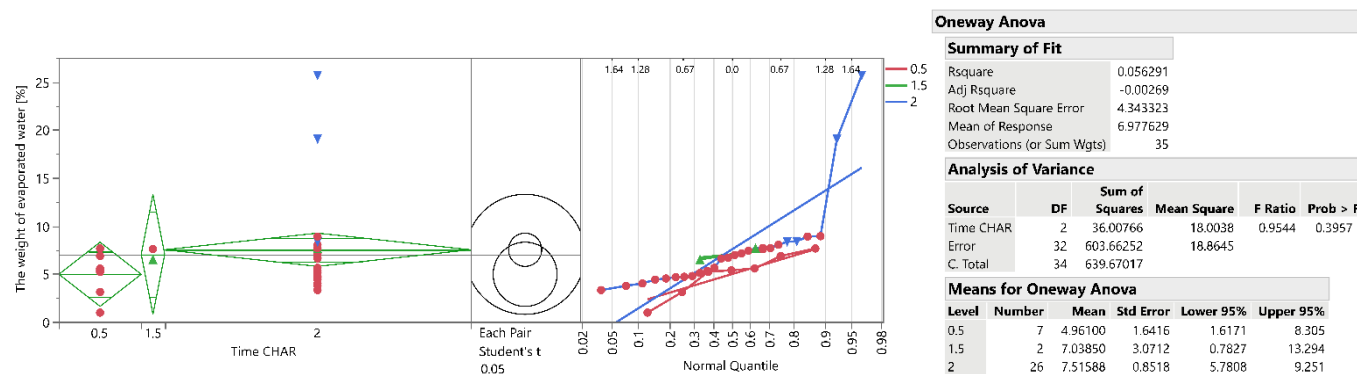


Figure 6: Analysis of ANOVA - the mass of evaporated water versus the time of heat

The analysis of the time influence on the inner surface of the samples showed a statistically significant difference in the values for the different time categories - 0.5 / 1.5 / 2 hours (See the picture Figure 7). On this basis, it can be argued that time play a statistically significant role in trying to increase and decrease the inner surface of the samples.

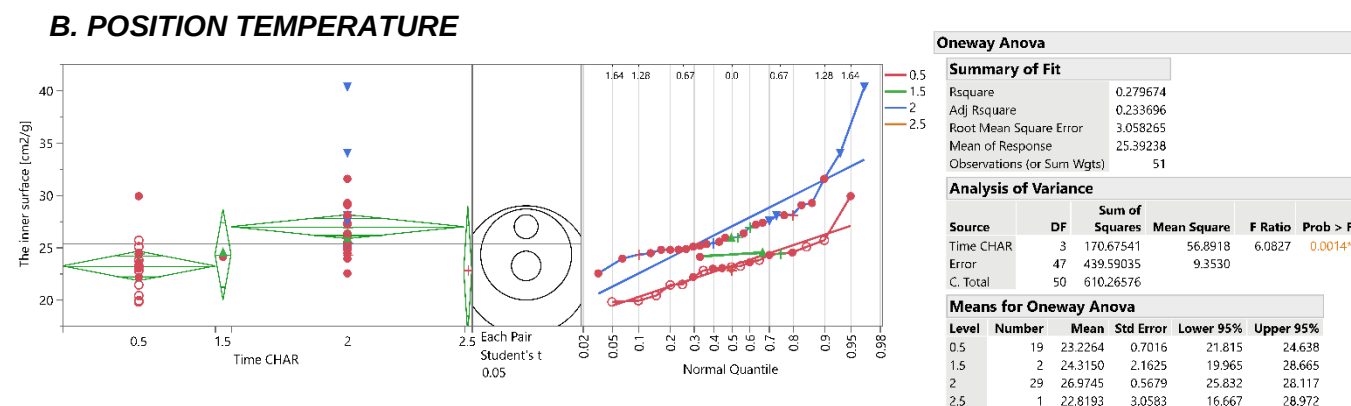


Figure 7: Analysis ANOVA – inner surface versus time of temperature activity

The analysis of the measured evaporated water weight values about the different temperature of 120/200/300 °C, respectively, did not show statistically significant variability, so it can be argued that the temperature not play a significant role in trying to achieve higher values of evaporated water (See the picture Figure 8).

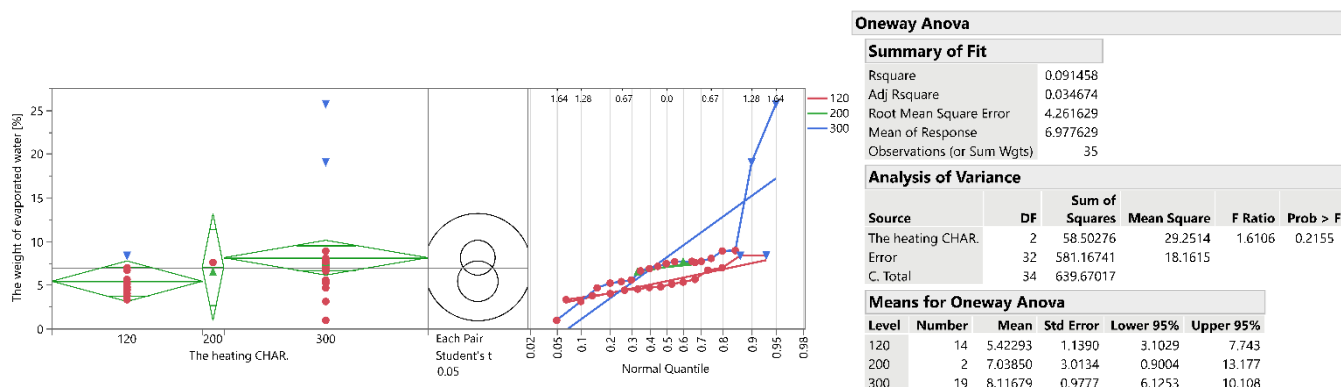


Figure 8: ANOVA analysis - Evaporated water weight versus heating temperature

Even the analysis of the temperature effect on the inner surface of the samples did not show a statistically significant difference in the values for the individual heat categories - 120/200/300 °C (See the picture Figure 9). On this basis, it can be stated that increasing / decreasing heating temperature cannot achieve statistically significantly higher / lower values of the inner surface of the individual samples.

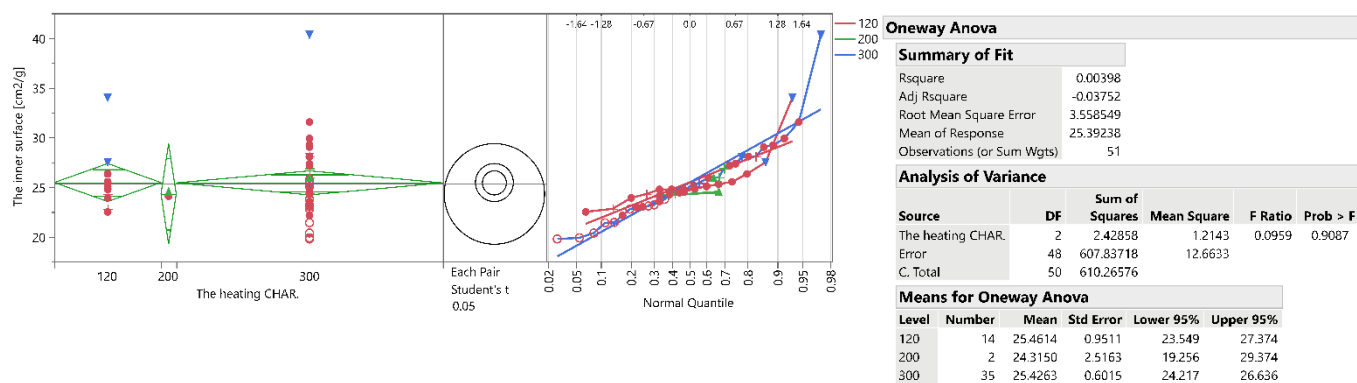


Figure 9: Analysis ANOVA - specific surface versus heating temperature

### C. TYPE OF ADDITIONAL ADJUSTMENTS (WITH additional modifications / He / Vac + He)

Individual samples subjected to heat treatment were subsequently exposed to He and vacuum in various combinations. In the analyzes, these variants are marked as follows:

The effect of the individual variants of the additional treatments was assessed by the ANOVA analysis concerning the outlet values of the inner surface and the weight of the evaporated water of the individual samples.

The weight of evaporated water is strongly dependent on the type of treatment – the values are significantly higher due to the effects of helium and vacuum. The ANOVA analysis confirmed a statistically significant difference in the resulting evaporated water values depending on the type of sample treatment (See the picture Figure 10).

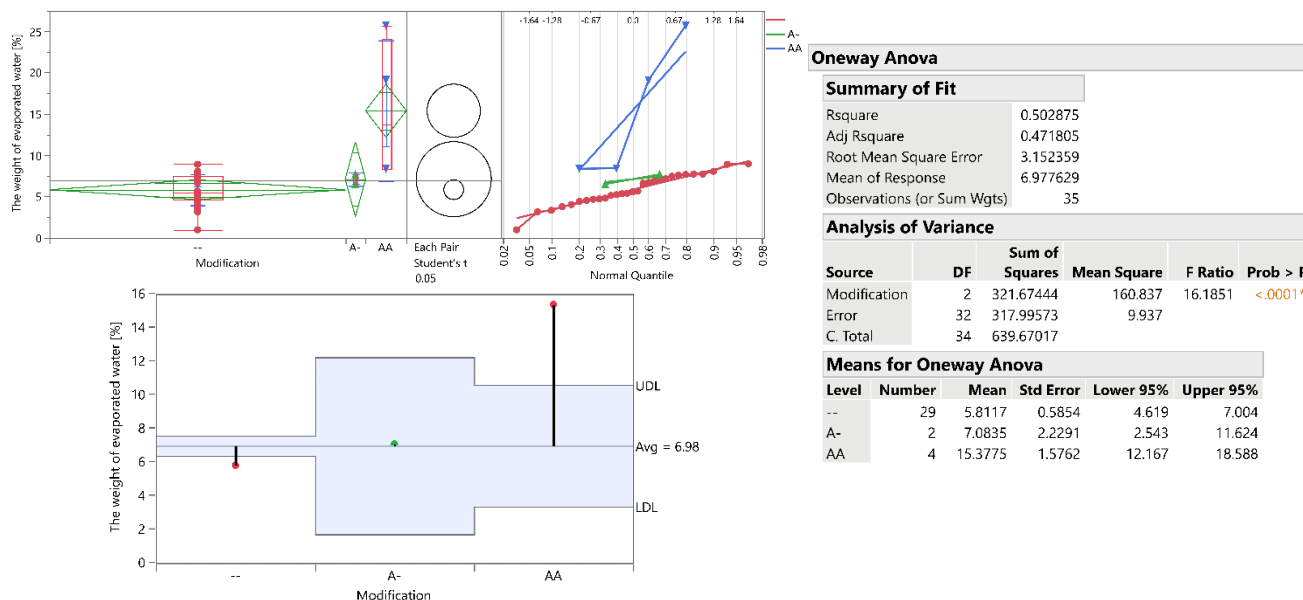


Figure 10: ANOVA analysis - evaporation water weight versus the type of treatment (He, Vac)

Further adjustments strongly influence the results of the internal indicator - the values are significantly higher due to the effects of helium, and Vac. Analysis of ANOVA confirmed a statistically significant difference in the resulting specific surface values, depending on the type of sample treatment (See the picture Figure 11). Variation of the "AA" effect – He and vacuum effects significantly increase the specific surface area of the samples above the average value.

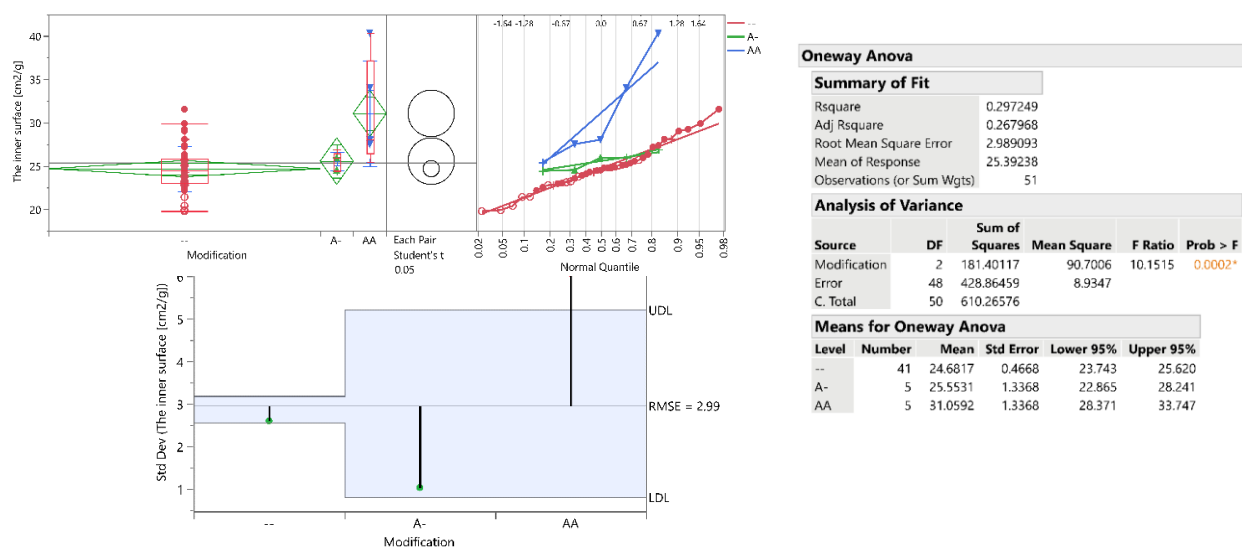


Figure 11: ANOVA analysis - inner surface versus the type of treatment (He, Vac)

## 5. Conclusion and recommendations

When measuring the specific surface area of the samples of natural zeolites, we used the top apparatus and followed all the recommended procedures.

The results can be summarized as follows:

Small or insignificant influence of changes in other monitored parameters:

1. The amount of the water evaporated from the zeolite with respect to the time of heating of the samples prior to the evaluation of the zeolite specific surface. As a result, it is known that the different heating time of the sample (0.5, 1.5 or 2 hours) does not have a significant effect on the change of the monitored parameter. (See the picture Figure 6).
2. Similar conclusions can come from the analysis of results where the different heating temperatures of zeolite samples (120, 200 and 300 ° C) were compared before determining their specific surfaces and the amount of evaporated water from the samples. (See the picture Figure 8).
3. Even the study of the influence of temperature change in the preparation of zeolite samples before measuring the specific surfaces did not show the effect of the change of this parameter on the resulting measured specific surfaces of the zeolite samples.

Significant effects of parameters on the resulting parameters:

1. In contrast, the different sampling times (0.5, 1.5 and 2 hours respectively) in their preparation for measuring the specific surfaces of the investigated zeolite samples significantly affect the measured specific surfaces (See the picture Figure 7)
2. The weight of evaporated water is strongly dependent on the type of treatment - the values are significantly higher due to the effects of helium and vacuum. Variation of the "AA" effect - helium and vacuum effects significantly increase the specific surface area of the samples above the average value. (See the Picture Figure 11).

Recommendations resulting from the measurement and statistical analysis performed:

In case it is necessary to know the values of the specific surfaces of the minerals, it will be appropriate to respect the established facts:

1. Increasing the heating temperatures of zeolite samples before measuring their specific surfaces above 120 ° C is inefficient
2. Extend heating time up to 2 hours increases the measured values of the specific surfaces of the zeolite samples

3. The most important factor in the increase of the measured values of the specific surfaces is the treatment of the samples before measuring the helium purification and vacuuming them.

In the study, we showed that, depending on the sample preparation, the measured specific surfaces of the zeolite are significantly affected. Achieving above-average values in the monitored property is conditioned by the type of selected treatment.

The facts found are valid for zeolite samples. In order to be generalized, measurements will also need to be repeated on other rock samples.

## 6. References

1. Rybár, P., Molokáč, M., Drevková, M., Drevko, S., Domaracká, L., Hvizdák, L.: Veľkokapacitná vodíková batéria – úložisko a zdroj energie v turizme (2017) 98 – 108.
2. Rybár, P., Molokáč, M., Drevková, M.: Vodík a jeho možnosti pri uskladňovaní elektrickej energie Enef (2016).
3. Mumpton, F.A.: „The natural zeolite story“, in Proceedings 3th Congresso Nazionale AIMAT, De Frede, Napoli, vol.1, pp. 31 – 64, 1996
4. Colella, C., Mumpton, F. A.: Natural zeolites for the third millenium, eds. de Frede-Editore, Napoli, Italy, pp. 484, 2005.
5. Šamajová, E.: Z histórie výskumu zeolitových surovín Slovenska, Odb. seminár „Prírodné a syntetické zeolity“, FCHPT STU Bratislava, 2003
6. Thommes, M., Guillet-Nicolas, R., Cychosz, K.A.: Physical Adsorption Characterization of Mesoporous Zeolites, Mesoporous Zeolites: Preparation, Characterization and Applications (2015) 349 – 384.
7. Lecloux, A.J., Atluri, R.b, Kolen'ko, Y.V.c, Deepak, F.L.c.: Discussion about the use of the volume specific surface area (VSSA) as a criterion to identify nanomaterials according to the EU definition. Part two: Experimental approach, NANOSCALE, Vol.:9 (2017) 14952 – 14966.
8. Zhou, B., Shi, J., Chen, Z.Q.: Experimental study on moisture migration process of zeolite-based composite humidity control material, Applied Thermal Engineering Vol.:128 (2018) 604 – 613.
9. Hadi, N., Alizadeh, R., Niaei, A.: Selective production of propylene from methanol over nanosheets of metal-substituted MFI zeolites, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol.: 54 (2017) 82 – 97.
10. Englert, A.H., Rubio, J.: Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite, International Journal of Mineral Processing, Volume 75, Issues 1 – 2, 2005, Pages 21 – 29, ISSN 0301-7516
11. Collins, F., Rozhkovskaya, A., Outram, J. Q., Millar, G.J.: A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA, Microporous and Mesoporous Materials, Volume 291, 2020, 109667, ISSN 1387-1811,
12. Drevková, M., Benčová, B., Tudos, D., Puzder, M., Šlosár, D.: Traditional and innovative applications of natural zeolites in household products (2017) 651 – 658.
13. Drevková, M., Vasilková Kmecová, M., Drevko, S., Gabániová, L., Šándorová, K., Kaľavský, M., Matisková, D., Tudos, D.: Nerudné suroviny - zeolity v národnom hospodárstve Slovenskej republiky (2017) 27 – 31
14. Reiffers, M., Rybár, P., Molokáč, Š.: Transformation of knowledge and technologies to the praxis obtained by research and development in the earth resources area. Košice 2013.
15. Földesová, M., Hudec, P.: Štúdium povrchových vlastností slovenského prírodného zeolitu-klinoptilolitu fyzikálnopu adsorpciou dusíka, Petroleum & Coal 49 (1), 34 – 40, 2007, dostupné online: [www.vurup.sk/pc](http://www.vurup.sk/pc)

## Štúdium zmien povrchových vlastností zeolitu v dôsledku jeho úprav

**Lucia DOMARACKÁ, Marcela TAUŠOVÁ, Ladislav HVIŽDÁK, Pavol RYBÁR, Mária DREVKOVÁ**

*Institute of Earth Resources, Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies  
Technical University of Košice, Letná 9, Košice, Slovakia*

*e-mail: lucia.domaracka@tuke.sk, marcela.tausova @tuke.sk, ladislav.hvizdak@tuke.sk,  
pavol.rybar@tuke.sk, maria.drevkova @tuke.sk*

### **Souhrn**

Zeolity sú minerálnym zdrojom, ktorý sa používa hlavne kvôli svojim špecifickým vlastnostiam. V článku sme skúmali, ako sa menia vlastnosti – vnútorná kapacita zeolitov – za určitých špecifických podmienok, ako je zmena teploty, zmena času, aplikácia hélia. Všetky merania špecifických povrchov pre zeolit sa uskutočňovali na prístroji Micromeritics Gemini VII – analyzátory povrchovej plochy a pórovitosti.

Vzorky sa merali (prach, rôzne frakcie, pelety) za rôznych podmienok: zmena teploty, aplikácia hélia (He), časové zmeny.

Vstupné a výstupné parametre jednotlivých experimentálnych vzoriek boli vyhodnotené pomocou deskriptívnej štatistiky. Všetky namerané údaje boli potom analyzované multidimenzionálnou analýzou a analýzou ANOVA s našou ambíciou identifikovať a kvantifikovať závislosť jednotlivých úprav vzoriek od celkového výkonu – namerané hodnoty hmotnosti odparenej vody, špecifický povrch.

Výsledky sú na konci rozdelené na malý alebo nevýznamný vplyv zmien v ďalších sledovaných parametroch a na významný vplyv parametrov na výsledné parametre.

Malý alebo nevýznamný vplyv zmien bol stanovený množstvom vody odparenej zo zeolitu vzhľadom na dobu ohrevu vzoriek pred vyhodnotením špecifického povrchu zeolitu. Podobné závery môžeme odvodiť z analýzy výsledkov, kde boli porovnané rôzne teploty zahrievania vzoriek zeolitu pred stanovením ich špecifických povrchov a množstva odparenej vody zo vzoriek.

Záverečné zistenia: významné účinky parametrov na výsledné parametre: rozdielny čas vystavenia vzoriek účinkom, ako je teplo, použitie vákua a hélia pri ich príprave na meranie špecifických povrchov skúmaných zeolitových vzoriek významne ovplyvňujú namerané špecifické povrchy. Hmotnosť odparenej vody silne závisí od typu úpravy - hodnoty sú vďaka účinkom hélia a vákua výrazne vyššie.

**Kľúčové slová:** zeolit, vzorky zeolitov, špecifický povrch, ANOVA, numerické analýzy, priemyselné horniny, teplota, hélium, čas

# Verification of the dependence of CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emission concentrations on vehicle ride dynamics and route profile

**Petra PROCHÁZKOVÁ**

Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchbát, Czech Republic

e-mail: [prochazkovap@tf.czu.cz](mailto:prochazkovap@tf.czu.cz)

## Abstract

The aim of this paper is to verify the dependence of CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emission concentrations on vehicle driving dynamics and route profile under real conditions of drive with petrol engine vehicle. The vehicle was tested on roads in hilly countryside in the Czech Republic. The experiments were focused on recording and analysing fuel consumption and subsequently production of emissions (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>). Results showed dependence between the average CO emissions and the average increase of instantaneous speed, slight tendency towards a lower CO<sub>2</sub> emission. Also, dependence between the average CO<sub>2</sub> emissions and the average gradient was proven, which means there is a tendency towards higher CO<sub>2</sub> emission concentrations in sections with higher average gradient. By contrast, dependence between the average NO<sub>x</sub> emissions and the average increase in instantaneous speed or the average gradient were not proved.

**Key words:** real driving emissions, concentrations of CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>

## Introduction

With their mere existence, everyone acts on their surroundings and affects the Earth's climatic system to a various degree. One of the possibilities is slowing down the rate of consumption of fossil energy sources and replacing them with other "non-fossil" or "low-carbon" sources. Transport, particularly individual transport by cars, is one of the main producers of pollution and greenhouse gas emissions in urban areas. Therefore, it is necessary to address, in a comprehensive manner, the technical possibilities of switching over to the use of alternative energy sources as well as social and cultural changes that are associated with the birth of a low-carbon society, which reduces the consumption of fossil fuels, the overall consumption of energy and, based on that, production of CO<sub>2</sub> emissions, too. This trend is also backed by European regulations that put great emphasis mainly on the decarbonisation of transport (Directive 98/69 / EC 1998), which implies increased generation of purely electrical energy and, consequently, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles. Promoting EVs only makes sense where the electricity they use is generated from renewable sources. It has been proven that EVs may be less friendly in terms of the production of emissions in certain areas of use than the conventional combustion-engine vehicles<sup>1</sup>.

Vehicle exhaust gases typically contain water vapour, nitrogen gas and carbon dioxide. Substances that can also be present include nitrous oxide, nitrogen dioxide, carbon monoxide, dust particles, benzene, formaldehyde, benzopyrene and other polyaromatic hydrocarbons, lead, mercury, arsenic, dioxins and other substances. Exhaust gases contribute a significant fraction to air pollution and contain substances mainly affecting the respiratory organs (e.g. oxides of nitrogen and particulate matter), some of the substances are toxic (such as carbon monoxide, blocking the capacity of haemoglobin to transfer oxygen) and/or carcinogenic (e.g. toluene, styrene, formaldehyde and benzopyrene). Contributing to the formation of smog and near-ground ozone, exhaust gases also pose a significant environmental

problem. Their composition depends on the fuel type, type and condition of the combustion system, filters, catalysts, etc.<sup>2</sup>

The need to determine the emissions of the running vehicles in real circumstances led to the development of Real Driving Emissions (RDE) tests, which have been mandatory for new vehicles since 2017 within the Euro 6 standard, as stipulated by Commission Regulation (EU) No 2016/427<sup>3</sup>.

Euro 6 defines the RDE test conditions and data analysis methods, including the major factors such as the effect of driving, ambient temperature, altitude and altitude difference. The European Commission (EC) has set (first in 1992) stringent emission limits, and certification tests that must be met by all new vehicles have been introduced<sup>4</sup>.

Both current and past emission level measurements within certification procedures are made on a chassis dynamometer in controlled laboratory conditions as prescribed in EU documents<sup>5,6</sup>. The standard driving cycles – the New European Driving Cycle (NEDC) and, currently, the Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycles (WLTC), have been criticised as not properly representing driving in real-life situations<sup>7</sup>. The differences between real driving cycles and the NEDC regarding fuel consumption and NO<sub>x</sub> production lie within the ranges of 12% to 30% and 32% to 628%, respectively<sup>5</sup>. This led to a test procedure aiming to ascertain the real driving emissions for the EURO 6 standard defining boundary conditions for roads and specific data analysis methods<sup>8</sup>.

For example, Faria et al.<sup>9</sup> presented a data analysis method for the use of the cold start and driving on a road. Some of the results presented show that the consumption is 110% higher in the cold start mode than in the hot start mode and emissions can be as much as 910% higher. As to the altitude and road gradient. Gallus et al.<sup>10</sup> analysed their effects on the CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions. By testing two LDVs the authors concluded that the emissions increase in all driving categories, reaching a maximum increase within the ranges of 66% to 81% for CO<sub>2</sub> and from 94% to 115% for NO<sub>x</sub>. Rapone and Andre<sup>11</sup> studied the effect of the traffic conditions by measuring the acceleration and NO<sub>x</sub> emissions. Accelerations and NO<sub>x</sub> emissions are most pronounced in the heavy urban setting, where the emissions NO<sub>x</sub> are three times as high as in the country setting where cars run at a steady speed. Gallus et al.<sup>12</sup> examined the effect of the driving style on the emissions. Three drivers who practised 3 different driving styles in 2 vehicles participated in the experiment. During normal to sharp driving, CO<sub>2</sub> emissions increase by 20% to 40%, NO<sub>x</sub> emissions, by 50% to 255% depending on both the driver and the vehicle.

The transport sector contributes nearly one-quarter to the total European greenhouse gas (GHG) emissions, road transport being the predominant contributor<sup>13</sup>. Road transport is also the main source of air pollutants, oxides of nitrogen (NO<sub>x</sub>) in particular<sup>14</sup>. So, traffic planning is an important step because drivers will presumably select a route that will minimise the travel time and/or the travel costs (including the toll where present)<sup>15</sup>. However, minimisation of the driver's own travel costs can bring an increase in the costs of the entire system<sup>16</sup>. Studies demonstrate that drivers' environmentally friendly behaviour can adversely affect the emissions of the whole system, and selection of a route to reduce the production of CO<sub>2</sub> can increase the quantities of other pollutants. Such results suggest that an approach taking into account multiple factors should be applied<sup>17</sup>.

The aim of this paper is to verify the dependence of CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emission concentrations on vehicle driving dynamics and route profile under real conditions of drive with petrol-engine vehicle. Test route was selected based on the results of questionnaire survey, which the respondents use most often to commute to work.

## Methods

A Škoda Citigo with a three-cylinder petrol engine by Škoda Auto (Figure 1) was used for this experiment.



**Figure 1: Škoda CitiGo**

The technical parameters of the vehicle are summarised in Table 1. Operational data from the engine control unit were recorded via an OBD interface (engine speed, vehicle speed) and, in addition, the VAG – COM diagnostics system was used. The measurement of the current position (GPS coordinates) and instantaneous speed was conducted by means of Garmin GPS 18x USB with a frequency of 1 Hz.

**Table 1: Technical parameters of Škoda CitiGo**

|                                               | <b>Škoda CitiGo</b>                     |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                               | <b>ENGINE</b>                           |
| <b>Engine type</b>                            | 3-cylinder, spark ignition, atmospheric |
| <b>Max. power</b>                             | 55 kW at 5 000 rpm                      |
| <b>Max. torque</b>                            | 95 Nm at 3 000 - 4 300 rpm              |
| <b>Fuel system</b>                            | Multi - point gasoline injection        |
|                                               | <b>CAR BODY</b>                         |
| <b>Service weight</b>                         | 929 kg                                  |
| <b>Manufacture year</b>                       | 2016                                    |
|                                               | <b>DRIVE PERFORMANCE</b>                |
| <b>Max. speed</b>                             | 160 km h <sup>-1</sup>                  |
| <b>Acceleration 0 - 100 km h<sup>-1</sup></b> | 13,2 s                                  |
| <b>Fuel consumption</b>                       | 4,7 l 100 km <sup>-1</sup>              |
| <b>Tank range</b>                             | 750 km                                  |

To measure Škoda CitiGo emissions, use was made of a PEMS VMK mobile on-board emission analyser, which employs the non-dispersion infrared (NDIR) method for detecting CO and CO<sub>2</sub> emissions and an electrochemical cell for detecting O<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions. The data were recorded with a frequency of 1 Hz onto a memory card. The technical data are summarised in Table 2.

**Table 2: Technical parameters of mobile emission analyser<sup>18</sup>**

| <b>Measured values</b> | <b>Measurement range</b> | <b>Resolution</b> | <b>Accuracy</b>                                            |
|------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------|
| CO                     | 0...10 % Vol.            | 0,001 % Vol.      | 0...0,67%:0,02% absolute, 0,67%...10%:3% of measured value |
| CO <sub>2</sub>        | 0...16% Vol.             | 0,01 % Vol.       | 0...10%:0,3% absolute, 10...16%:3% m.v.                    |
| HC                     | 0...20 000 ppm           | 1 ppm             | 10 ppm or 5% m.v.                                          |
| NO <sub>x</sub>        | 0...5 000 ppm            | 1 ppm             | 0...1 000 ppm: 25 ppm, 1 000...4 000 ppm: 4% m.v.          |
| O <sub>2</sub>         | 0...22% Vol.             | 0,1% Vol.         | 0...3%:0,1%, 3...21%:3%                                    |

The experimental drives were made during working days in the period of morning and afternoon rush hours from 19 to 21 September 2017. The route was covered five times. The driver maintained a careful driving style affected by the traffic situation. The outdoor temperature was around 12°C, with no wind, the skies were partly cloudy and the roads were dry. The indoor temperature in the vehicle was set at 20°C, and no electric device was used. Table 3 gives a brief description of the route in terms of the time and length.

**Table 3: Characteristics of the route measured**

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| Total route length (km)          | 80,77       |
| Total travel time (s)            | 7 239 ± 278 |
| Avg. speed (km h <sup>-1</sup> ) | 44± 3       |
| Elevation difference (m)         | 442         |
| <b>HORIZONTAL SECTIONS</b>       |             |
| Section length (km)              | 6,58        |
| <b>UPHILL SECTIONS</b>           |             |
| Section length (km)              | 37,62       |
| Ascent (m)                       | 1,953       |
| Avg. gradient (%)                | 5,19        |
| <b>DOWNHILL SECTIONS</b>         |             |
| Section length (km)              | 36,57       |
| Descent (m)                      | 1,943       |
| Avg. gradient (%)                | 5,31        |

The measurement was conducted in an area with moderately high elevation range, in the hilly terrain near the municipality of Ústí nad Labem (Figure 2). An extensive questionnaire survey was also conducted in the area. A test route, which the respondents use most often to commute to work, was selected based on the results.



**Figure 2: Map of the area - Ústí nad Labem**

The elevation profile of the test route is shown in Figure 3.



**Figure 3: Elevation profile of the area under test**

## Result and discussion

The measured data contained 11,791 second-by-second records of current vehicle driving parameters. The focus was put on driving dynamics, gradient and CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions. The analysis aimed to verify the dependence of CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations on the driving dynamics and route profile. Similar approaches are used for the development of a new method that is related to the dynamics of the certification driving cycles and dynamics of the test vehicles on the road, with the objective to evaluate the fuel consumption and real driving emission tests in a manner comparable to the certification driving cycles, as recommended by Varella et al.<sup>25</sup>. The data set and variables were prepared in the following manner. Records made when the vehicle stood still, i.e. zero-speed records, were excluded from the data. Furthermore, some problematic records made when the vehicle was moving at slow speeds up to 1 km/h, but it was not meaningful to take such records into account considering the accuracy of measurement of GPS coordinates and other parameters, were also excluded from the data.

8,630 records remained in the data set after the abovementioned records had been excluded. These records were divided into continuous sections with typical duration of 100 records. In several cases, the number of records was different when the sections were interrupted due to the data exclusion. Overall, the route was divided into 91 sections. Average CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions as well as average percentage gradient were calculated and the driving dynamics was characterised for each of these sections.

The average CO and CO<sub>2</sub> emission concentrations for a given section were calculated as the average of all records. Individual records showed, for each second, CO and CO<sub>2</sub> emissions in percent, with the resultant value characterising the CO and CO<sub>2</sub> emissions for a given section also being shown in percent. The range of average values of CO and CO<sub>2</sub> emissions within the 91 sections is displayed in Table 4.

**Table 4: The average CO, CO<sub>2</sub> emissions**

| The average CO emissions (%)         | The average CO <sub>2</sub> emissions (%) |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| Median = 0,0214                      | Median = 12,8153                          |
| 25%-75% = (0,0136,0,0389)            | 25%-75% = (10,7522,13,8285)               |
| Non - Outlier Range = (0,0007,0,073) | Non - Outlier Range = (6,222,14,5111)     |

The median value of the average CO emissions within the 91 sections of the route was 0.021%. The middle 50% of the values of CO emissions ranged between 0.014% and 0.039%. The non-outliers ranged from 0.0007% to 0.073%. The average emissions of several sections were evaluated as outliers or extreme values, from 0.073% to 0.5%.

The median value of average CO<sub>2</sub> emissions within the 91 sections of the route was 12.8%. The middle 50% of CO<sub>2</sub> emission concentrations values ranged between 10.8% and 13.8%. The non-outliers ranged from 6.2% to 14.5%. The average emissions of several sections were evaluated as outliers or extreme values, these included emissions lower than 6.2%, two values amounted nearly to zero. The same extreme levels were attained<sup>19</sup>, where the emissions were governed by the road profile as well as by the driving style<sup>20</sup>.

The average NO<sub>x</sub> emissions for a given section were calculated as the average of all the records. Individual records showed, second by second, NO<sub>x</sub> emissions in ppm, with the resultant value characterising the NO<sub>x</sub> emissions for a given section also being shown in ppm. The distribution of the values of average NO<sub>x</sub> emissions within the 91 sections was displayed by table 5.

**Table 5: The average NO<sub>x</sub> emissions**

| The average NO <sub>x</sub> emissions (ppm) |
|---------------------------------------------|
| Median = 30,92                              |
| 25%-75% = (24,55,38,24)                     |
| Non - Outlier Range = (10,7568,54,13)       |

The median value of the average NO<sub>x</sub> emissions within the 91 sections of the route was 30.92 ppm. The middle 50% of the values of NO<sub>x</sub> emissions ranged between 24.6 ppm and 38.2 ppm. The non-outliers ranged from 10.8 ppm to 54.1 ppm. The average emissions of several sections were evaluated as outliers or extreme values, greater than 54.13 ppm. Overall, the results indicate that the NO<sub>x</sub> emissions are low compared to the EU requirements for road traffic<sup>21</sup>.

The average gradient for a given section was calculated as the ratio of the elevation gain and the distance covered in metres. The result was given in per cent. The descent was not included.

A change in instantaneous speed was calculated for each consecutive pair of records with respect to a given section. All the positive values within a given section, i.e. where acceleration occurred, were used for calculating the average relative to the total number of records of the given record. Specifically, if a section included 100 records, 98 changes in instantaneous speed were calculated, and a certain number of them was positive. The positive changes were added up and divided by 99. The resultant variable characterises the driving dynamics. The higher this number was, greater and more frequent acceleration occurred in the section concerned. The variable is reported in kilometres per hour.

The distribution of the values of the average *ascent and acceleration* within the 91 sections is listed in Table 6.

**Table 6: The average ascent and acceleration**

| The average ascent (%)          | The average acceleration (km/h)       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Median = 0,9227                 | Median = 0,6768                       |
| 25%-75% = (0,5671,1,8919)       | 25%-75% = (0,3778,0,9374)             |
| Non - Outlier Range = (0,3,727) | Non - Outlier Range = (0,1374,1,6455) |

The median value of the average gradient within the 91 sections of the route was 0.92%. The middle 50% of the values of the average gradient ranged between 0.56% and 1.89%. The non-outliers ranged between 0% (i.e. sections with no gradient) and 3.7%. The average gradients of several sections were evaluated as outliers, greater than 3.7%. The maximum gradient in one of the sections was 9.1%.

The median value of the average acceleration within the 91 sections of the route was 0.68 km/hs. The middle 50% of the values of the average acceleration ranged between 0.38 km/hs and 0.94 km/hs. The range from the minimum to the maximum was between 0.14 km/hs and 1.65 km/hs.

When evaluating the variability of the values of the individual variables (CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, gradient and driving dynamics), it is possible to state that the data prepared encompassed diverse sections with sufficiently variable values of driving dynamics and gradient, whose effect on the emissions was further investigated using statistical methods. As Varella et al.<sup>22</sup> pointed out, reproducibility of the tests can pose a problem. In fact, the dynamic and environmental factors (such as the ambient conditions, route, etc.) are unique for the specific geographic location, which can be representative of one site.

To prevent the results from being distorted owing to extreme and outlying values, the data were converted to ranks (rank 1 was assigned to the lowest values and rank 91 to the highest) and tested using an independence test based on Spearman's rank correlation coefficient. Statistical hypotheses formulated for individual variables were tested at a significance level of 0.05. The TIBCO STATISTICA 13 program was employed for calculating the statistical testing, and Microsoft Excel was used for data preparation. Table 7 summarizes the resulting operating parameter values of tested vehicle.

**Table 7: Consumption and production of emissions**

| Vehicle      | Fuel consumption (l 100 km <sup>-1</sup> ) | CO <sub>2</sub> (g km <sup>-1</sup> ) | CO (mg km <sup>-1</sup> ) | NO <sub>x</sub> (mg km <sup>-1</sup> ) |
|--------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| Škoda CitiGo | 4,61±0,22 l                                | 108±6                                 | 816±84                    | 24,11±0,31                             |

### **Production of CO emissions**

**H: There is rank dependence between the average CO emission concentrations and the average increase in instantaneous speed.**

The p-value of the independence test based on Spearman's correlation coefficient amounted to 0.004, i.e. lower than the selected significance level of 0.05. The hypothesis was not rejected. At the significance level of 0.05, dependence between the average CO emissions and the average increase in instantaneous speed was proven. Considering a positive value of the correlation coefficient of 0.3, it is possible to interpret that there is a slight tendency towards a higher CO emission concentration in sections with a higher value of the average increase in instantaneous speed. The effect of the driver on the CO production can be disregarded: in fact, the emission concentrations normally lie well below the standard limits<sup>23</sup>.

**H: There is rank dependence between the average CO emission concentrations and the average gradient.**

The p-value of the independence test based on Spearman's correlation coefficient amounted to 0.001, i.e. lower than the selected significance level of 0.05. The hypothesis was not rejected. At the significance level of 0.05, dependence between the average CO emissions and the average gradient was proven. Considering a positive value of the correlation coefficient of 0.35, it is possible to interpret that there is a slight tendency towards higher CO emission concentrations in sections with a higher value of the average gradient.

### **Production of CO<sub>2</sub> emissions**

**H: There is rank dependence between the average CO<sub>2</sub> emission concentrations and the average increase in instantaneous speed.**

The p-value of the independence test based on Spearman's correlation coefficient amounted to 0.024, i.e. lower than the selected significance level of 0.05. The hypothesis was not rejected. At the significance level of 0.05, dependence between the average CO<sub>2</sub> emission concentrations and the average increase in instantaneous speed was proven. Considering a negative value of the correlation coefficient of -0.24, it is possible to interpret that there is a slight tendency towards a lower CO<sub>2</sub> emission concentration in sections with a higher value of the average increase in instantaneous speed, which depends on the driving style, where excessive speed and aggressive acceleration play a major role<sup>24</sup>.

**H: There is rank dependence between the average CO<sub>2</sub> emission concentrations and the average gradient**

The p-value of the independence test based on Spearman's correlation coefficient amounted to 0.000, i.e. lower than the selected significance level of 0.05. The hypothesis was not rejected. At the significance level of 0.05, dependence between the average CO<sub>2</sub> emission concentrations and the average gradient was proven. Considering a positive value of the correlation coefficient of 0.51, it is possible to interpret that there is a slight tendency towards a higher CO<sub>2</sub> emission concentration in sections with a higher value of the average gradient.

### **Production of NO<sub>x</sub> emissions**

**H: There is rank dependence between the average NO<sub>x</sub> emission concentrations and the average increase in instantaneous speed.**

The p-value of the independence test based on Spearman's correlation coefficient amounted to 0.793, i.e. higher than the selected significance level of 0.05. The hypothesis was rejected. At the significance level of 0.05, dependence between the average NO<sub>x</sub> emissions and the average increase in instantaneous speed was not proven.

**H: There is rank dependence between the average NO<sub>x</sub> emission concentrations and the average gradient.**

The p-value of the independence test based on Spearman's correlation coefficient amounted to 0.507, i.e. higher than the selected significance level of 0.05. The hypothesis was rejected. At the significance level of 0.05, dependence between the average NO<sub>x</sub> emissions and the average gradient was not proven.

The NO<sub>x</sub> concentrations observed during the testing of passenger cars with a petrol-fuelled engine in dependence on the route were negligible. Next research will target passenger vehicles with CI engines, where a very wide range of NO<sub>x</sub> emissions was observed also for Euro 6 vehicles<sup>25</sup>. Emissions can also be reduced by using new-generation biofuels<sup>26</sup>.

## Conclusion

The experiments demonstrated that with respect to the production of harmful emissions, there was dependence between the average CO emission concentrations and the average increase in instantaneous speed. The results can also be interpreted that there was a slight tendency towards higher CO emission concentrations in sections with a higher value of the average increase in instantaneous speed, and a slight tendency towards a higher CO emission concentration in sections with a higher value of the average gradient. There was a slight tendency towards lower CO<sub>2</sub> emission concentrations in sections with a higher value of the average increase in instantaneous speed, too. Also, dependence between the average CO<sub>2</sub> emission concentration and the average gradient was proven, which means there is a tendency towards a higher CO<sub>2</sub> emission concentration in sections with a higher value of the average gradient. By contrast, dependence between the average NO<sub>x</sub> emissions and the average increase in instantaneous speed or dependence between the average NO<sub>x</sub> emissions and the average gradient were not proved. Based on these results, the drivers could decide how they will affect the production of emissions based on their choice of route taking into consideration the course of gradient and driving style.

## Acknowledgement

*The paper was supported by ULS Prague, Faculty of engineering - IGA 2017: 31150/1312/3122 - Monitoring the quality of life of rural microregions with regard to energy consumption*

## References

1. Manjunath, A. & Gross, G. 2017. *Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs)*. Energy Policy 102, 423 – 429. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.12.003. ISSN 03014215
2. ŠUTA, Miroslav. *Účinky výfukových plynů z automobilů na lidské zdraví*. Plzeň: Děti Země, 2008. ISBN 80-86678-10-5.
3. Comission, E, 2016. *Eu transport in figures*. <https://doi.org/10.2832/861735>.
4. Hooftman, N., 2018. *A review of the European passenger car regulations – real driving emissions vs. local air quality*. Renew. Sust. Energ. Rev. 86, 1 – 21. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>.
5. Duarte, G.O., Gonçalves, G.A., Farias, T.L., 2016. *Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-world measurements*. Transp. Res. Part D: Transp. Environ. 44, 43 – 54. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.009>.

6. Bielaczyc, P., Woodburn, J., Szczotka, A., 2016. *Exhaust Emissions of Gaseous and Solid Pollutants Measured over the NEDC, FTP-75 and WLTC Chassis Dynamometer Driving Cycles*. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1008>. Copyright
7. Pavlovic, J., Ciuffo, B., Fontaras, G., Valverde, V., Marotta, A., 2018. *How much difference in type-approval CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)?* Transp. Res. A Policy Pract. 111, 136 – 147. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.002>.
8. Vlachos, T.G., Bonnel, P., Weiss, M., Giechaskiel, B., Riccobono, F., 2015. *New Euro 6 Legislation on RDE: Overview and Technical Challenges*. Dostupné z: <https://www.aecc.eu/wp-content/uploads/2016/08/04-AECC-RDE-Seminar-JRC-New-Euro-6-Legislation-on-RDE-Overview-and-Technical-Challenges.pdf>
9. Faria, M.V., Varella, R.A., Duarte, G.O., Farias, T.L., Baptista, P.C., 2018. *Science of the Total environment engine cold start analysis using naturalistic driving data: City level impacts on local pollutants emissions and energy consumption*. Sci. Total Environ. 630, 544 – 559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.232>.
10. Gallus, J., Kirchner, U., Vogt, R., Benter, T., 2017a. *Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a portable emission measurement system (PEMS)*. Transp. Res. Part D: Transp. Environ. 52, 215 – 226. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.011>.
11. Rapone, M., Andre, M., 2009. *Analysis and Modelling of the Pollutant Emissions From European Cars Regarding the Driving Characteristics and Test Cycles*. 43, pp. 986 – 995. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.013>.
12. Gallus, J., Kirchner, U., Vogt, R., Benter, T., 2017b. *Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a portable emission measurement system (PEMS)*. Transp. Res. Part D: Transp. Environ. 52, 215 – 226. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.011>.
13. EU. (2018), *Statistical Pocketbook 2018. Connecting Europe. Mobility and Transport*, Publications Office of the European Union (2018)
14. EEA. (2018a). *Air quality in Europe - 2018 report*. (European Environment Agency, Ed.), EEA Report No 12/2018.
15. Perederieieva, O., Raith, A., Schmidt, M., *Non-additive shortest path in the context of traffic assignment*, European Journal of Operational Research, Volume 268, Issue 1, 2018, pp. 325 – 338, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.017>.
16. van Essen, M., Thomas, T., van Berkum, E., & Chorus, C., (2016) *From user equilibrium to system optimum: a literature review on the role of travel information, bounded rationality and non-selfish behaviour at the network and individual levels*, Transport Reviews, 36:4, 527 – 548, <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1125399>.
17. Bandeira J.M., Carvalho D.O., Khatkhat A.J., Roupail N.M., Fontes T., Fernandes P., S. Pereira, Coelho M.C. *Empirical assessment of route choice impact on emissions over different road types, traffic demands, and driving scenarios* IJST, 10 (3) (2016), pp. 271 – 283
18. KRUMBHOLC, Miroslav a Martin KOTEK. *Analysis of operation parameters of electric and gasoline vehicle in real driving*. Agronomy Research. 2019, 2019(17(S1)), 1089 – 1096. Available at: doi:<https://doi.org/10.15159/AR.19.035>
19. Varella, R.A.1, Ribau, J.P., Baptista, P.C., Sousa, L., Duarte, G.O. 2019. *Novel approach for connecting real driving emissions to the European vehicle laboratorial certification test procedure*. Environmental Science and Pollution Research 26(34), 35163 – 35182.
20. Varella, R.A.2, Faria, M.V., Mendoza-Villafuerte, P., Baptista P.C., Sousa, L., Duarte, G.O. 2019. *Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions*. Science of the Total Environment 658, 879 – 894.

21. Hooftman, N., Messagie, M., Van Mierlo, J., Coosemans, T. 2018. *A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 86, 1 – 21.
22. Varella, R.A., Duarte, G., Baptista, P., Sousa, L., Mendoza Villafuerte, P. 2017. *Comparison of Data Analysis Methods for European Real Driving Emissions Regulation*. In: SAE Technical Papers, SAE World Congress Experience, WCX 2017, Detroit, 4 – 6 April 2017, 127407.
23. Huang, Y., Ng, E.C.Y., Zhou, J.L., Surawski N.C., Lu X., Du B., Forehead H., Perez, P., Chan, E.F.C. 2021. *Impact of drivers on real-driving fuel consumption and emissions performance*. Science of the Total Environment 798, 149297.
24. Ng, E.C.Y., Huang, Y., Hong, G., Zhou, J.L., Surawski, N.C. 2021. *Reducing vehicle fuel consumption and exhaust emissions from the application of a green-safety device under real driving*. Science of the Total Environment 793, 148602.
25. Ntziachristos, L., Papadimitriou, G., Ligterink, N., Hausberger, S. 2016. *Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NO<sub>x</sub> evolution*. Atmospheric Environment 141, 542 – 551.
26. Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K., Dalai, A.K. 2010. *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14(2), 578 – 597.

## Ověření závislosti koncentrace CO, CO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> na dynamice jízdy vozidla a profilu trasy

**Petra PROCHÁZKOVÁ**

Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchbát,  
e-mail: [prochazkovap@tf.czu.cz](mailto:prochazkovap@tf.czu.cz)

### Abstrakt

Cílem tohoto článku je ověření závislosti koncentrace CO, CO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> na dynamice jízdy vozidla a profilu trasy v reálném provozu vozidla Škoda Citigo s benzínovým motorem. Vozidlo bylo testováno na silnicích v kopcovité krajině v České republice. Prováděné experimenty byly zaměřeny na záznam a analýzu spotřeby energie (paliva) a následné produkce emisí (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>). Výsledky prokázaly závislost mezi průměrnými emisemi CO a průměrným zvýšením okamžité rychlosti, mírnou tendencí k nižším emisím CO<sub>2</sub>. Rovněž byla prokázána závislost mezi průměrnými emisemi CO<sub>2</sub> a průměrným převýšením, což znamená, že v úsecích s vyšší hodnotou průměrného převýšení existuje tendence k vyšší koncentraci emisí CO<sub>2</sub>. Naproti tomu nebyla prokázána závislost mezi průměrnými emisemi NO<sub>x</sub> a průměrným zvýšením okamžité rychlosti nebo průměrným převýšením.

**Klíčová slova:** skutečné emise v reálném provozu, koncentrace CO, CO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub>

České ekologické manažerské centrum, z.s. a časopis WASTE FORUM  
zvou na  
**Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí (TVIP 2020/2021)**  
který se koná v náhradním termínu  
**19. – 21. 10. 2021 v Hustopečích, hotel Amande.**  
V rámci TVIP se spolu s konferencí APROCHEM koná tradičně symposium  
**Výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii**  
**ODPADOVÉ FÓRUM 2021**

**Symposium je určeno:**

- k prezentaci výsledků (především) aplikovaného výzkumu z celé oblasti průmyslové a komunální ekologie,
- pro zástupce podnikatelské sféry a veřejné správy, aby se seznámili s výzkumnými tématy a projekty s cílem eventuálního převzetí nebo rozvinutí dosažených výsledků v praxi,
- k seznámení představitelů výzkumné obce s potřebami reálného „podnikového života“ a případnému navázání spolupráce.

**Původně vyhlášený program** poté, co ani v náhradním listopadovém, či březnovém termínu se nemohl konat, **zůstává v naprosté většině v platnosti a až do 31. 8. 2021 je možné jej doplnit o nově přihlášené příspěvky (později až po dohodě).** Průběžně aktualizovaný je ke zhlédnutí [ZDE](#).

**Původní přihlášky k účasti automaticky zůstávají v platnosti** (pokud účastník sám svou účast nezruší), **nově se k účasti lze přihlásit do 15. 9. 2021.**

K tradičním problémovým okruhům:

**Odpady:**

- Systémové otázky odpadového hospodářství
- Materiálové, biologické a energetické využití odpadů
- Nebezpečné odpady, odstraňování odpadů
- Sanace ekologických zátěží a následků havárií

**Voda:**

- Čištění průmyslových odpadních vod
- Získávání cenných látek z odpadních vod
- Recyklace vody
- Nakládání s kaly, kapalnými odpady

**Ovzduší:**

- Čištění odpadních plynů a spalín
- Snižování a měření emisí
- Doprava a lokální zdroje
- Kvalita ovzduší a zdravotní rizika

**Věda a výzkum pro oběhové hospodářství:**

- Šance a bariéry cirkulární ekonomiky
- Nové zdroje surovin a energie
- Inovativní technologické postupy a inovativní technologie
- Nové materiály a jejich aplikace (bio- a nanomateriály)

je letos ve spolupráci s Centrem výzkumu Řež opět zařazeno téma **Radioaktivní odpady**.

## INFORMACE PRO AUTORY

**Přihlášky příspěvků lze zasílat do naplnění kapacity** – přihlašovací formulář naleznete [ZDE](#). Úspěšné odeslání přihlášky je automaticky potvrzeno. Zhruba měsíc před konáním konference bude na [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz) zveřejněn aktualizovaný program. Autoři příspěvků budou požádáni, aby zkontrolovali správnost informací uvedených v programu.

**Abstrakta (souhrn) přednášek** – stručný souhrn obsahu přednášky i vývěsky je nedílnou součástí [přihlášky příspěvků](#), rozsah textu max. 500 znaků (včetně mezer). Abstrakt bude zahrnut do tištěného programu konference.

**Plné texty přednášek** – autoři všech příspěvků, **tj. přednášek i vývěsek**, žádáme o včasné předání graficky upraveného plného textu příspěvku v **elektronické podobě** (MS Word) **nejpozději do 30. 9. 2021**. Po tomto termínu nemůžeme garantovat jejich zařazení do sborníku na CD-ROM, který obdrží účastníci konference při registraci.

**Grafická úprava textu** – příspěvky před zařazením do sborníku konference neprocházejí redakční a ani grafickou úpravou, při jejich psaní můžete s výhodou využít šablonu, kterou spolu s detailním popisem formátování najdete na [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz) v sekci [Informace pro autory](#).

**Prezentace** – je nutné předat přítomné obsluze nejpozději 5 minut před začátkem sekce, do které je zařazena přednáška. Pokud prezentaci obdržíme do 30. 9. 2021, bude rovněž zařazena do sborníku na CD-ROM.

**Pro vlastní prezentaci přednášky** mají přednášející (pokud není uvedeno jinak) k dispozici **15 minut a 5 minut je vyhrazeno pro diskusi**. Ve spolupráci s předsedajícími sekcí se snažíme o maximální dodržování vyhlášeného časového rozvrhu.

**Přednáškové místnosti** budou vybaveny **dataprojektory**, včetně **notebooků**. Použití vlastního notebooku je možné, funkčnost propojení je třeba na místě předem ověřit ve spolupráci s technikem a současně je nezbytné poskytnout prezentaci obsluze pro další zpracování na DVD.

**Vývěsky** – formátu **A0** (na výšku) budou přichyceny lepicí páskou na tvrdý podklad (sklo, dřevěné obklady). Vystaveny budou po celou dobu konference v chodbě před hlavním sálem nebo přímo v sále. V programu bude vymezen časový prostor („Autorská prezentace vývěsek“), kdy by autoři měli být přítomni u své vývěsky.

**Účast autorů:** Autoři se rovněž **přihlašují k účasti**, na konferenci musí být přihlášen a **osobně přítomen alespoň jeden z autorů** příspěvku, anebo jím pověřená osoba. Jednacím jazykem je **čeština a slovenština**. **Zahraniční hosté** jsou srdečně zváni, tlumočení však organizátor nezajišťuje, prezentace příspěvků v angličtině je možná. **Za neopřednášenou přednášku nebo nevystavený poster bude dodatečně autorovi fakturován poplatek 1000 Kč** (bez DPH) za zařazení příspěvku do programu a jeho uveřejnění ve sborníku.

**Recenze:** Organizátor konference nemá námitek, aby autoři nabídli svůj příspěvek z konference k uveřejnění v některém recenzovaném časopise, včetně časopisu WASTE FORUM, který je indexován v databázi **SCOPUS**.

**Komerční přednášky či krátká sdělení** jsou za úplatu možné. Rozsah možností firemní prezentace je široký, stejně jako cenové rozpětí (*více [ZDE](#)*). Rozhodně **není možné komerční sdělení prezentovat jako odbornou přednášku či vývěsku**. V případě porušení této zásady bude dodatečně fakturována příslušná částka podle výše zmíněného ceníku.

## INFORMACE PRO ÚČASTNÍKY

**Hotel Amande**, kde se TVIP 2021 koná, se nalézá na adrese [Husova 8, Hustopeče](#).

**Vložené** na TVIP zahrnuje vstup na obě akce (APROCHEM i ODPADOVÉ FÓRUM), brožuru s programem a souhrny všech příspěvků a CD-ROM či flashdisk s plnými texty příspěvků a předem včas dodanými prezentacemi. Vybírat je možné ze tří typů vloženého:

**Plné vložené** (4 450 Kč bez DPH)

**Dvoudenní vložené** (3 950 Kč bez DPH)

**Jednodenní vložené** (3 450 Kč bez DPH)

**Přihlášky účasti** je možné zasílat **do 15. 9. 2021** (dále možné po dohodě s pořadatelem) prostřednictvím připraveného [internetového formuláře](#). V přihlášce specifikujte také veškeré požadavky na stravu a ubytování.

**Ubytování a stravování** zajišťuje pořadatel. Vzhledem k omezené ubytovací kapacitě **hotelu Amande Hustopeče** nabízíme ubytování také v těsně sousedícím **hotelu Rustikal a v Penzionu pod Radnicí**. Ubytování je možné v jednolůžkových anebo dvojlůžkových pokojích. V případě dvojlůžkového pokoje je nutné v [přihlášce účasti](#) specifikovat jméno spolubydlícího.

**Stravování** během konference pro ty, kteří je mají objednáno, je zajištěno v hotelu Amande, výjimkou jsou snídaně, ty má každý účastník v tom hotelu, kde je ubytován.

**Podrobnější informace**, včetně cen ubytování a stravování najdete na [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz) v sekci [Informace pro účastníky](#).

### **Open Innovation Matchmaking in Ecology (Waste Management)**

Cílem symposia je mj. napomoci setkávání a propojování účastníků za účelem navazování nových příležitostí ke spolupráci. Abychom tento aspekt podpořili, připravili jsme **ve spolupráci s WASTen, z.s.**, tzv. „**Open Innovation Matchmaking in Ecology (Waste Management)**“. Každý, kdo bude mít zájem o asistované propojení s jiným účastníkem, může tak učinit předem prostřednictvím připraveného [formuláře](#) nebo na místě na registraci TVIP.

### **Exkurze**

Exkurze je plánována do **Vetropack Moravia Glass**, jednoho z největších výrobců obalového skla a současně jednoho ze dvou zpracovatelů odpadového skla v ČR, nebo bude možné navštívit do areálu společnosti **HANTÁLY, a.s.** navštívit provoz skládky, dotřídňovací linky, kompostárny,

Exkurze, včetně dopravy na místo, jsou zdarma. **Zájem o účast je nutné uvést v přihlášce účasti nebo dodatečně emailem na [cemc@cemc.cz](mailto:cemc@cemc.cz).**

### **DŮLEŽITÉ TERMÍNY na závěr:**

**Termín konání: 19. – 21. 10. 2021**, z toho

Odpadové fórum: 19. – 21. 10. 2021

Aprochem: 20. – 21. 10. 2021

**[Přihlášky příspěvků](#): 31. 8. 2021** (dále po dohodě s pořadatelem)

**Zaslání plných textů: 30. 9. 2021**

**[Přihlášky účasti](#): 15. 9. 2021**