

PAPERS/RAZPRAVE

WATER QUALITY OF SELECTED WATERCOURSES IN ZASAVJE KAKOVOST VODE IZBRANIH VODOTOKOV V ZASAVJU

AUTHORS/AVTORJA

Lenart Štaut*Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Anton Melik Geographical Institute, Novi trg 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenia**lenart.staut@zrc-sazu.si, <https://orcid.org/0000-0003-0095-3920>***dr. Tajan Trobec***University of Ljubljana, Faculty of Arts, Department of Geography, Aškerčeva cesta 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenia**tajan.trobec@ff.uni-lj.si, <https://orcid.org/0000-0002-8784-4366>*DOI: <https://doi.org/10.3986/GV96102>

UDC/UDK: 556.53:502(497.432)

COBISS: 1.01

ABSTRACT

Water quality of selected watercourses in Zasavje

Good surface water quality is one of the most important goals of sustainable water management, along with sufficient quantity. This paper presents an analysis of water quality in the Medija, Trboveljščica and Boben watercourses in Zasavje (central Slovenia), which are not included in regular water quality monitoring. Water quality was assessed on the basis of own field and laboratory analysis of selected physico-chemical parameters. In the period 2020–2021, 9 cyclical samplings were carried out at 16 locations at different times of the year. It was found that the rivers Trboveljščica and Boben are significantly polluted, while the river Medija is in a much better condition. In the headwaters, water pollution is relatively low and mainly due to agricultural activities, which is also reflected in better water quality. In the lower reaches, the Boben and Trboveljščica rivers in particular are subject to significant pollution from industry and households, which are also the main sources of pollution.

KEY WORDS

watercourse pollution, surface water quality, physico-chemical water parameters, Boben, Medija, Trboveljščica

IZVLEČEK

Kakovost vode izbranih vodotokov v Zasavju

Dobra kakovost površinskih voda je poleg njihovega ustreznega količinskega stanja eden ključnih ciljev trajnostnega upravljanja z vodami. V prispevku je predstavljena analiza kakovosti vode na zasavskih vodotokih Medija, Trboveljščica in Boben, ki niso vključeni v redni monitoring spremljanja kakovosti voda. Kakovost vode smo ocenjevali na podlagi lastnih terenskih in laboratorijskih analiz izbranih fizikalno-kemijskih parametrov. V obdobju 2020–2021 smo v različnih letnih časih izvedli 9 cikličnih vzorčenj na 16 lokacijah. Izkazalo se je, da sta Trboveljščica in Boben onesnažena, medtem ko je Medija v bistveno boljšem stanju. V povirjih so obremenitve voda razmeroma majhne in večinoma pogojene s kmetijsko

dejavnostjo, kar se odraža tudi na njihovem boljšem kakovostnem stanju. V spodnjem toku sta zlasti Boben in Trboveljščica izpostavljena znatnim pritiskom industrije in gospodinjstev, ki so tudi glavni razlogi za onesnaženost.

KLJUČNE BESEDE

onesnaženost vodotokov, kakovost površinskih tekočih voda, fizikalno-kemijski parametri vode, Boben, Medija, Trboveljščica

The article was submitted for publication on May 13, 2024.

Uredništvo je prispevek prejelo 13. maja 2024.

1 Introduction

Water quality reflects its physical, chemical and biological properties, which are assessed depending on the type of water resource (e.g., rivers, lakes, groundwater) or the type of use (e.g., drinking water, industrial water, irrigation water) (Dobnikar Tehovnik et al. 2022). Water quality degradation is mainly influenced by various anthropogenic pressures caused by agriculture, settlement and urbanisation, industry, energy production, tourism and other activities (Meybeck, Peters and Chapman 2005). Surface waters must be in good chemical and ecological status, which is defined in the European Union Water Directive (Directive ... 2000) and in Slovenia in the Regulation on the Status of Surface Waters (Uredba o stanju ... 2009). The chemical status of water bodies is assessed on the basis of the content of 45 substances or groups of substances defined as priority substances and eight other pollutants. The ecological status is assessed on the basis of the deviation of ecosystems from their natural state, using selected physico-chemical, biological and hydromorphological quality elements.

Water quality can also be assessed by analysing selected physico-chemical parameters, such as the content of various nutrients, the pH value, the specific electrical conductivity, the biochemical and chemical oxygen demand, etc. (Urbanič and Toman 2003; Boyd 2015; Pantelić et al. 2022).

Monitoring of the status of water bodies in the Republic of Slovenia is carried out by the Slovenian Environment Agency (ARSO) on the basis of the Water Act (Zakon o vodah 2002) and the Environmental Protection Act (Zakon o varstvu ... 2022) and in accordance with the monitoring programme for five-year periods (Dobnikar Tehovnik et al. 2022). It is carried out on larger watercourses or their sections, the so-called water bodies (Pravilnik ... 2005), and in areas where water is abstracted for drinking water supply, while smaller, subordinate tributaries are excluded, although they make up the majority of river networks. Surface water bodies are defined as watercourses with a contributing area of more than 100 km², natural lakes with a water surface area of more than 0.5 km², seas and brackish lakes, artificial canals with a length of more than 3 km and water reservoirs on rivers and artificial lakes with a surface area of more than 0.5 km². According to some estimates (Baattrup-Pedersen et al. 2018), 58% of the European continent is covered by headwaters, and due to Slovenia's pronounced headwater character, the situation is similar in Slovenia (Trobec 2011).

Due to the great natural and socio-geographical diversity of these catchments, the watercourses often have very different physico-chemical, hydromorphological and other characteristics (Baattrup-Pedersen et al. 2018; Trobec 2019).

Many authors in Slovenia and abroad have investigated the water quality of smaller, subordinate watercourses by analysing selected physico-chemical parameters. Rusjan (2008) analysed the temporal dynamics of nutrient release in the area of the Padež stream. Kovačič and Rupnik (2015; 2019) analysed the quality of the water in Rakiški stržen. Trobec (2017; 2019; 2022), who sampled watercourses where there is no official monitoring of water quality, determined the quality in the watercourses in Kamniška Bistrica, Jezersko and Loški potok using a method similar to the one used in this study. Breznik and Trobec (2022) analysed the quality of groundwater in the Mislinja aquifer, which is also not included in official water quality monitoring.

Jarvie et al. (2008) investigated the concentrations of nitrogen and phosphorus compounds in the Wye and Avon river catchments in the UK. Yue et al. (2019) also addressed a similar topic when they monitored the contamination of karst aquifers with nitrates and the effects of different land uses on the amount of pollutants. Nguyen and Cai (2019) monitored the quality of surface waters and groundwater near Singapore by analysing similar parameters as in our research.

The Sava river has several smaller tributaries in the area of Zasavje in central Slovenia. Among them, Medija, Trboveljščica and Boben stand out in terms of water content and length of the streams. Due to their small catchment areas and modest water volume, the aforementioned watercourses are not considered as the so-called water bodies (Pravilnik ... 2005), therefore they are excluded from regular water

quality monitoring and assessment of the chemical and ecological status of water, which is why we do not know their quality.

There is very limited data and research available on the water quality of Zasavje watercourses, excluding the Sava river. The issue of pollution in these watercourses is partially addressed in the Environmental Protection Program of the Municipality of Trbovlje (Tahir et al. 2009), which includes data on wastewater discharge into the Trboveljščica and Sava rivers.

In 2006, during the monitoring of surface water quality in Slovenia, ARSO reported elevated phosphate levels downstream of the confluence of the Boben and Sava rivers, identifying the chemical products factory (*Tovarna kemičnih izdelkov Hrastnik* - TKI) in Hrastnik as a likely source of pollution (Cvitanič et al. 2008). Investigative monitoring conducted in 2009 measured mercury content in the Boben and Trboveljščica basins, revealing elevated levels at the Boben's confluence with the Sava. This was attributed to former pollution or the resuspension of mercury from the sediment, rather than current emissions from TKI (Cvitanič et al. 2013).

Due to persistently high mercury levels, regular monitoring was introduced at the Boben's confluence with the Sava. Mercury concentrations at this site have remained above permissible levels for many years now (Cvitanič et al. 2022).

Given the area's high population density, economic reliance on industrial and mining activities, anthropogenic alterations to riverbeds, limited self-purification capacities, and high ecological sensitivity, we assume significant pressures on the water quality of Medija, Trboveljščica, and Boben. These factors underscore the importance of understanding the quality of these watercourses, which are also crucial for maintaining the biodiversity and overall water quality of the Sava river in its middle course.

In this research, we conducted nine cyclic samplings across 16 locations over the course of one year in Medija, Trboveljščica, and Boben streams. We analysed selected physico-chemical water quality parameters and evaluated the water quality at these sites based on measured values and exceedances of recommended and limit values.

2 Study area

The studied area, drained by the Medija, Trboveljščica, and Boben streams and their tributaries (Brnica, Bevščica, Kotredrščica, and Orehovica), is located in the Zasavje statistical region (central Slovenia), encompassing the municipalities of Hrastnik, Trbovlje, and Zagorje ob Savi, north of the Sava river (Figure 2). The total surface area of the region is 153.9 km². The Medija basin constitutes the largest portion, covering 97.5 km², while the Boben and Trboveljščica basins span 30.8 km² and 25.5 km², respectively. On average, the area receives between 1,200 and 1,400 mm of precipitation annually (ARSO 2021a). The basins lie at altitudes ranging from 210 to 1,203 meters. The geological composition of the Boben and Trboveljščica basins is similar. In the upper sections, non-carbonate rocks such as shales, sandstones, and conglomerates dominate, while carbonate rocks prevail in the middle and lower sections. The Medija basin, being larger, has a more varied geological structure. Carbonate rocks (dolomite and limestone) predominate in the upper, headwaters reaches, transitioning to non-carbonate rocks (sands and sandstones) in the middle reaches near Kisovec, and returning again to carbonate rocks (limestone and dolomite) in the lower reaches until its confluence with the Sava river (Buser 1979a; 1979b). Based on data from the Zagorje hydrological station on Medija stream for the period 1981–2010, the studied watercourses exhibit a rain-snow discharge regime, characterized by pronounced autumn highs and summer lows (Figure 1; Frantar and Hrvatin 2005). The mean annual discharge(sQs) of the Medija in Zagorje was recorded at 2.1 m³/s, with a specific runoff (q) of 22.5 l/(s × km²), slightly below the Slovenian average of 27 l/(s × km²) (ARSO 2021c). Using flow values from the Medija and the basin size ratios (Trobec 2008), the sQs of the Boben and Trboveljščica at their confluences with the Sava were estimated at 0.7 m³/s and 0.6 m³/s, respectively.

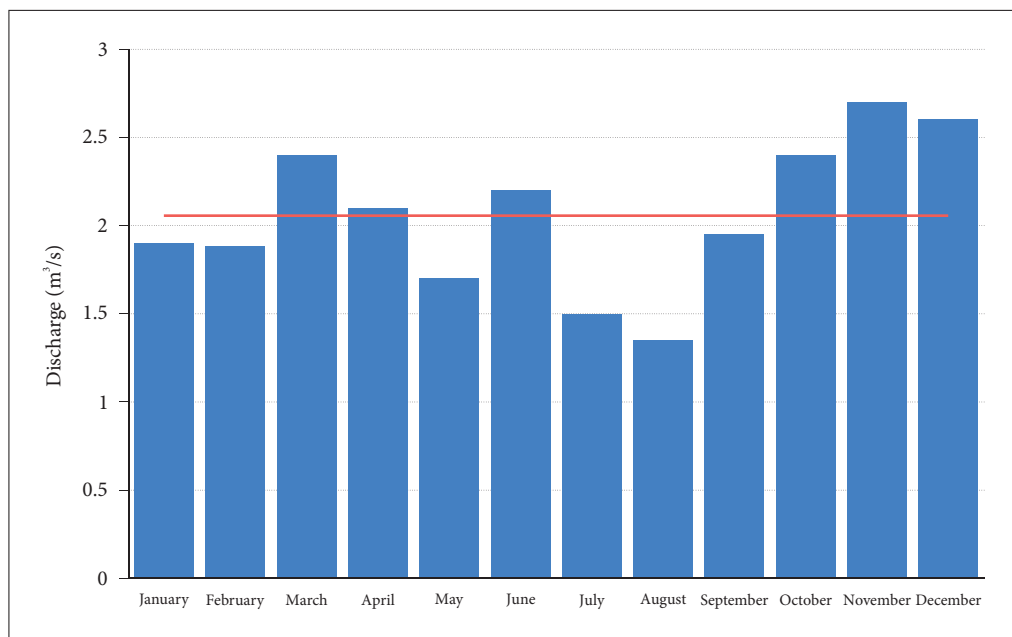


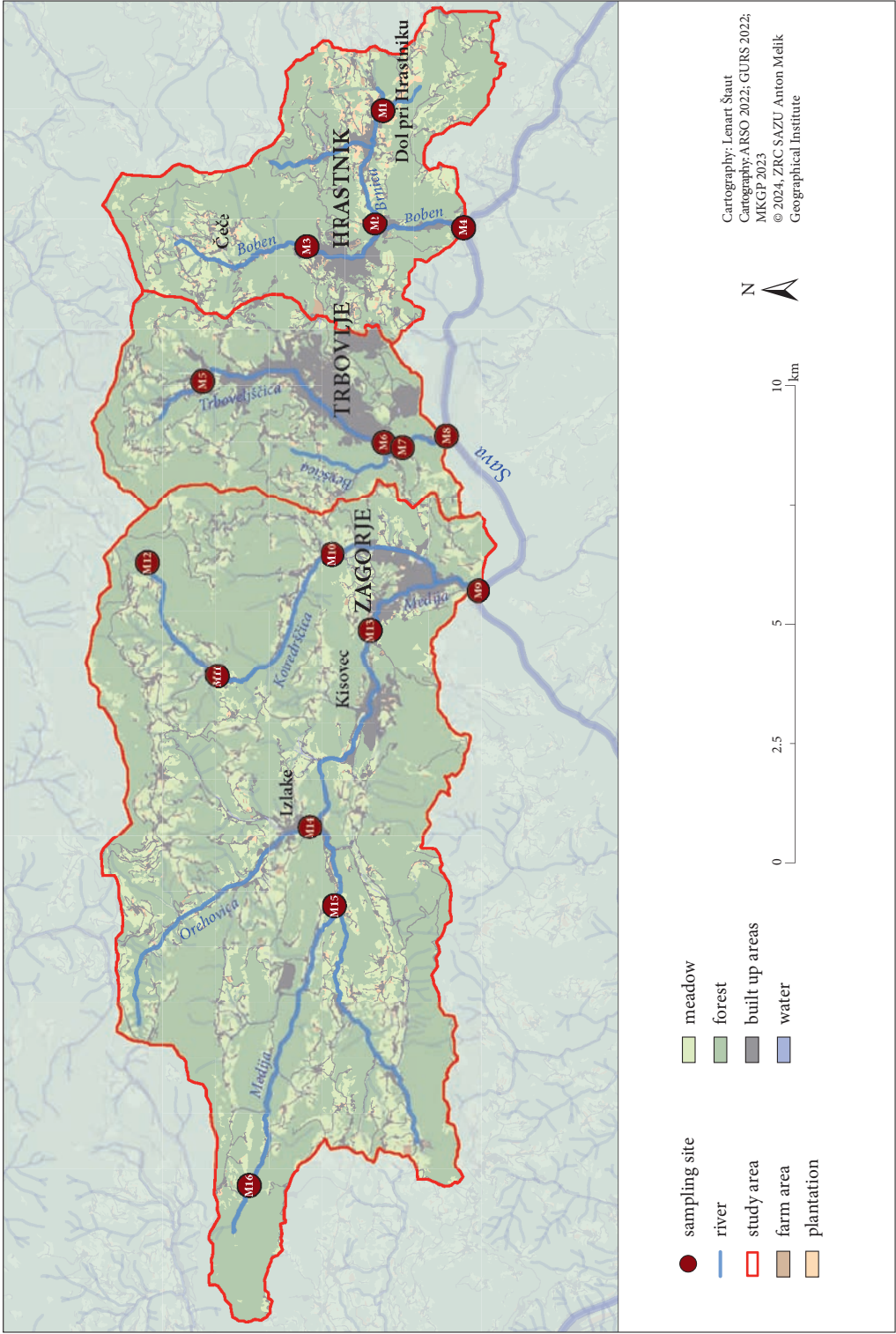
Figure 1: Hydrogram of Medja near Zagorje ob Savi for the period 1981–2010 (data source: ARSO 2021c).

The municipalities of Hrastnik, Trbovlje, and Zagorje ob Savi collectively house 41,461 inhabitants, resulting in a population density of 180 people/km², significantly above the Slovenian average. Most residents are concentrated in the municipal centers located in valley bottoms. The municipality of Zagorje ob Savi has the largest population, with 16,379 residents, followed by Trbovlje with 16,024 and Hrastnik with 9,058 (Prebivalstvo ... 2021). Despite economic restructuring over the last decade, the area's economy remains heavily industrial, with several factories situated adjacent to the studied watercourses, placing additional pressure on the environment (Regionalni ... 2022). According to ARSO (2021b), the majority of industrial wastewater in the studied municipalities is treated in sewage treatment plants. Forest is the dominant land use across the basins, covering more than half of the area. This is followed by grasslands and built-up areas, with the Trboveljščica basin having the largest proportion of built-up land (18.5%) (MKGP 2021). The studied watercourses are torrential, characterized by rapid responses to rainfall. Due to urbanisation of floodplains, sections are regulated and heavily modified in exposed areas (Klabus 1995).

3 Methodology

Based on the characteristics of the river network and the physical and socio-geographical features of the area, we selected 16 sampling sites across the watercourses and their tributaries. These sites were chosen to capture the geographical diversity of the contributing areas as well as the potential impacts of key sources of water pollution in the studied region. Examples include the chemical and glass industries in Hrastnik, the influence of larger settlements (Trbovlje and Zagorje), and the effects of agricultural activities in the upper reaches of the watercourses. Sampling was conducted at four locations in Boben basin, four locations in Trboveljščica basin and at eight locations in the Medija basin (Figures 2 and 3; Table 1) (Štut 2021).

Figure 2: Overview map of the study area with sampling sites. ► page 34



The measurements were conducted between March 15, 2020, and April 17, 2021, during which we performed nine sampling sessions (Table 2). This one-year sampling and analysis period offers preliminary insights of seasonal variations in the physico-chemical parameters of the selected watercourses. Initially, 12 sampling sessions were planned, but due to COVID-19 containment measures such as restrictions on movement within municipal boundaries and limited laboratory access, we completed nine sessions only. Samples were collected in the morning at low water levels, at least one week after the rainfall, to ensure consistent conditions. The samples were stored in a cool, dark environment and analysed later the same day. On-site measurements were performed using a multi-parameter meter, while the remaining analyses were conducted in the laboratory.

We measured 11 parameters to assess water quality, namely: temperature ($^{\circ}\text{C}$), pH, nitrate (mg/l NO_3^-), nitrite (mg/l NO_2^-), phosphate ($\text{mg/l PO}_4^{3-}\text{-P}$), sulfate (mg/l SO_4^{2-}), chloride (mg/l Cl^-), ammonium (mg/l NH_4^+), oxidation-reduction potential (mV ORP), oxygen content (mg/l O_2), oxygen saturation in water (% O_2), and specific electrical conductivity ($\mu\text{S/cm SEC}$). Nitrate, nitrite, chloride,

Table 1: Sample sites (the colours correspond to those in Figures 4–10: dark blue – the Boben river basin, light blue – the Trboveljščica river basin, green – the Medija river basin).

Sampling site	Name of the sample site
M1	the upper stream of Brnica
M2	the lower stream of Brnica
M3	the upper stream of Boben
M4	Boben before the confluence with Sava
M5	Trboveljščica above Trbovlje
M6	Trboveljščica below Trbovlje
M7	Bevščica above the confluence with Trboveljščica
M8	Trboveljščica before the confluence with Sava
M9	Medija before the confluence with Sava
M10	Kotredrščica above Zagorje
M11	Kotredrščica medium course
M12	Kotredrščica spring
M13	Medija above Zagorje
M14	Orehovica above the confluence with the Medija
M15	Medija after the confluence with Kanderšica
M16	Medija source

Table 2: Dates of measurements according to meteorological seasons.

year	winter	spring	summer	autumn
2020		March 15 April 22	June 28 July 27	September 21
2021	December 23 February 12	March 7 April 17		

ammonium, and sulfate concentrations were measured using VISOCOLOR ECO colorimetric and titration tests, while phosphate was determined using the highly sensitive VISOCOLOR HE test, both manufactured by Macherey-Nagel. Field measurements of pH, specific electrical conductivity (SEC), oxygen content, oxygen saturation, and oxidation-reduction potential (ORP) were carried out with a Hanna HI98196 multi-parameter meter. To evaluate the results, we relied on recommended



Figure 3: Sampling site M8, Trboveljščica before the confluence with Sava.

Table 3: Recommended and limit values of the parameters (*data applies to values in drinking water, so we did not take it into account in the quality evaluation; **empirically estimated value based on various sources) (data sources: ⁽¹⁾Uredba o kakovosti ... 2002; ⁽²⁾Uredba o stanju ... 2009; ⁽³⁾Boyd 2015; ⁽⁴⁾Basic principles ... 2021; ⁽⁵⁾Nacionalni ... 2024).

parameter	natural background	recommended value	limit value	measuring range of the tests	unit
nitrate	5 ⁽²⁾	7 ⁽²⁾	9.5 ⁽²⁾	0–120	mg/l NO ₃ ⁻
nitrite	near 0 ^(3, 4)	0.01 ⁽¹⁾	/	0–0.5	mg/l NO ₂ ⁻
chloride	few mg/l ⁽³⁾	250 ⁽⁵⁾ *	/	0–60	mg/l Cl ⁻
phosphate	0.01 ^(1, 4)	/	0.15**	0–0.25	mg/l PO ₄ -P
sulphate	few mg/l ⁽³⁾	15 ⁽²⁾	150 ⁽²⁾	25–200	mg/l SO ₄ ²⁻
ammonium	0.02 ⁽³⁾	0.04 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	0–3	mg/l NH ₄ ⁺
pH	/	6–9 ⁽¹⁾	/	0–14	/
oxygen content	/	≥ 7 (100% of measurements) and ≥ 9 (50% of measurements) ⁽²⁾	≥ 6 (100% of measurements) and ≥ 9 (50% of measurements) ⁽²⁾	/	mg/l O ₂
SEC	500 ⁽³⁾	/	/	0–10,000	μS/cm

and limit values specified in various Slovenian regulations (e.g., Uredba o kakovosti ... 2002; Uredba o stanju ... 2009; Nacionalni ... 2024) (Table 3). For parameters without established limit values in Slovenia (e.g., phosphate, electrical conductivity), we referenced international guidelines (Boyd 2015; Basic ... 2021). For nitrate and sulfate, limit values for achieving good ecological status were used, while recommended values corresponded to those for achieving a very good ecological status. For nitrite, ammonium, pH, and oxygen content, the recommended and limit values applicable to salmonid waters were used, considering the upper course nature of the analysed watercourses. To identify key pollution sources, we applied theoretical frameworks for assessing water quality through the analysis of selected physico-chemical parameters (e.g., Urbanič and Toman 2003; Boyd 2015).

4 Results

The sampling results are presented as average values for each sample location, with outlier values for individual parameters highlighted. The average pH values are relatively consistent across the basin, ranging from 7.7 to 8.2 (Figure 4), indicating predominantly alkaline water. Only one measurement deviated from this trend.

The highest pH value (8.54) was recorded at the confluence of the Medija with the Sava (sample site M9), while the lowest pH value (6.61) was observed at the confluence of the Boben with the Sava (sample site M4).

Chloride concentrations generally increase downstream, with the most significant rise observed in the Boben and Trboveljščica basins, particularly downstream of the settlements of Hrastnik and Trbovlje (Figure 5). A more moderate increase is also seen in the Medija basin. The highest average chloride concentration (43.4 mg/l) and the highest individual measurement (60 mg/l), which was at the upper limit of the test's measurement range, were recorded in the Boben basin, just upstream of its confluence with the Sava (sample site M4). A similar downstream increase is observed for nitrate concentrations (Figure 5). The Boben and Trboveljščica rivers show a significant rise in nitrate levels downstream of Hrastnik and Trbovlje. The highest nitrate concentration (70 mg/l) was recorded at sample site M4. In contrast, the lowest nitrate values were measured in the Medija basin, where at the source, nitrate concentrations were below the sensitivity of the test (1 mg/l) in three sampling events. On average, nitrate concentrations in the Medija basin remained within the expected natural background levels.

The average concentrations of nitrite, ammonium, and phosphate (Figure 6) exhibit similar trends in both the Boben and Trboveljščica basins, with a noticeable increase downstream from the settlements of Hrastnik and Trbovlje. In the Trboveljščica basin, ammonium concentrations slightly decrease between sample sites M6 and M8, while in the Boben basin, there is a marked increase in both ammonium and phosphate levels at the confluence with the Sava (sample site M4). At this location, phosphate concentrations were consistently at the upper limit of the measurement range of the test (0.25 mg/l) throughout all sampling events. In the Trboveljščica basin, nitrite concentrations increased between sample sites M6 and M8, despite the inflow from the Bevščica tributary, which has lower nitrite levels. A slight increase in nitrite concentrations was also observed downstream in the Medija basin. The highest average nitrite concentrations (0.46 and 0.43 mg/l) were measured at sample sites M6 and M8 in the Trboveljščica basin, where individual measurements occasionally reached the upper limit of the test's measurement range (0.5 mg/l). Similar elevated nitrite values were also occasionally detected in the Boben basin. The same trend was observed for ammonium, with the highest concentrations (which were also at the test's upper limit of sensitivity, 3 mg/l) recorded at sample sites M4, M6, and M8, in the lower reaches of both the Trboveljščica and Boben streams. The highest average ammonium concentration (1.13 mg/l) was found in the Trboveljščica basin at sample site M6.

Only the Boben and Trboveljščica basins showed notable sulfate concentrations (Figure 7). As with other parameters, elevated sulfate levels were primarily detected downstream from the settlements of

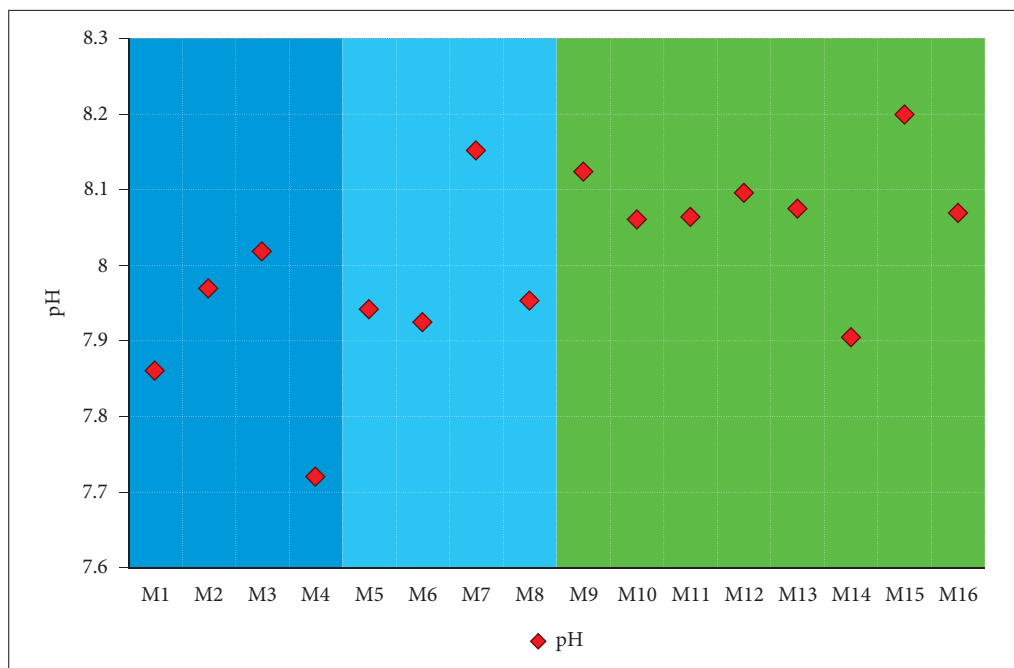


Figure 4: Average pH values at sample sites.

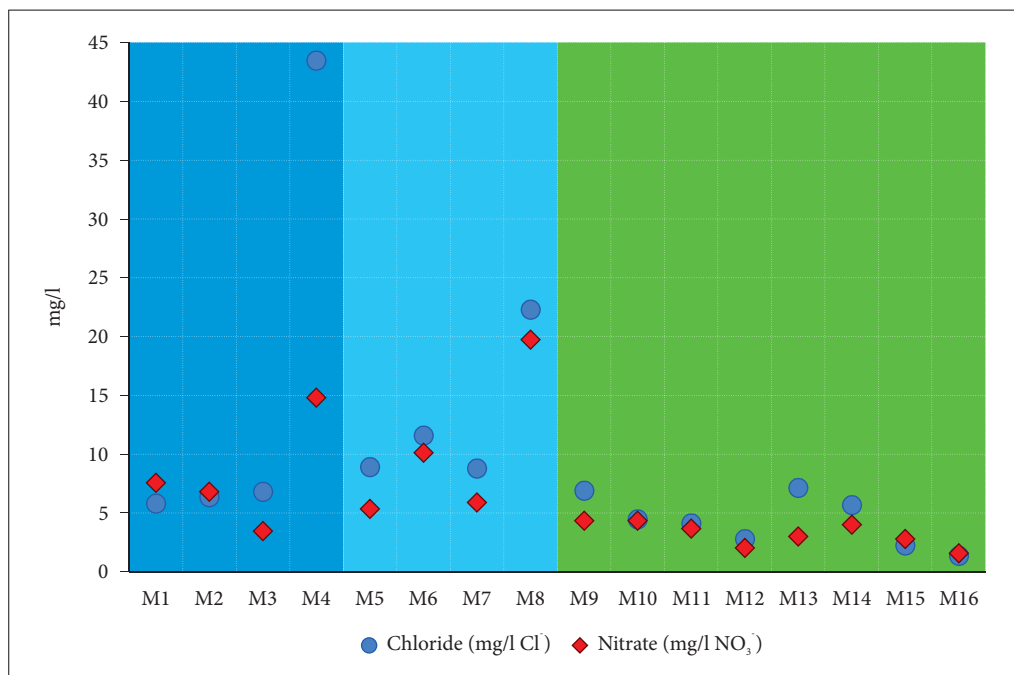


Figure 5: Average values of chloride and nitrate at the sample sites.

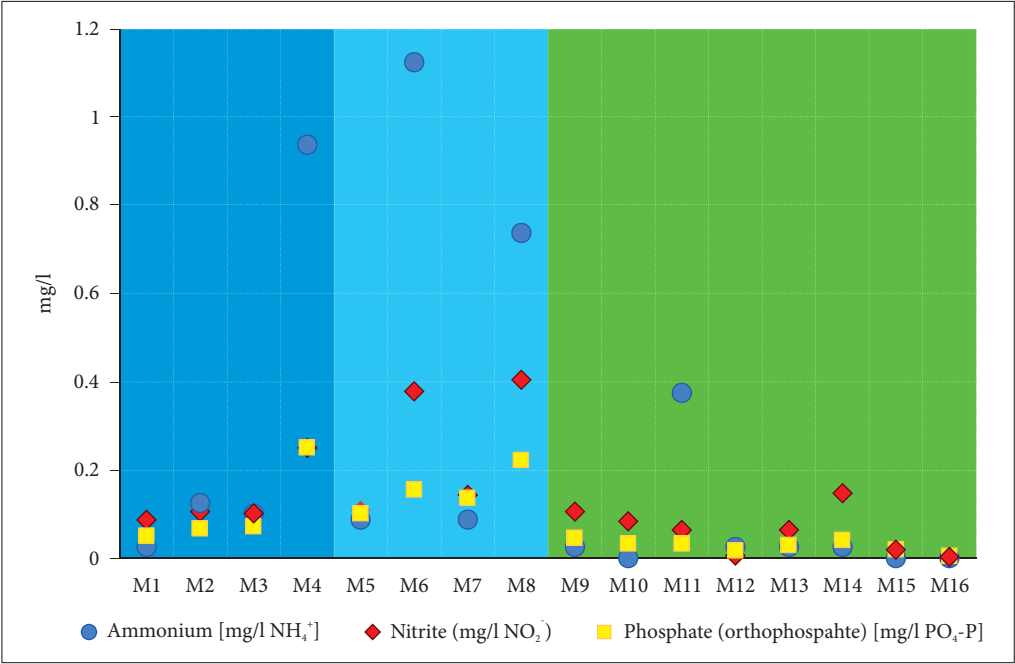


Figure 6: Average values of nitrite, ammonium and phosphate at the sample sites.

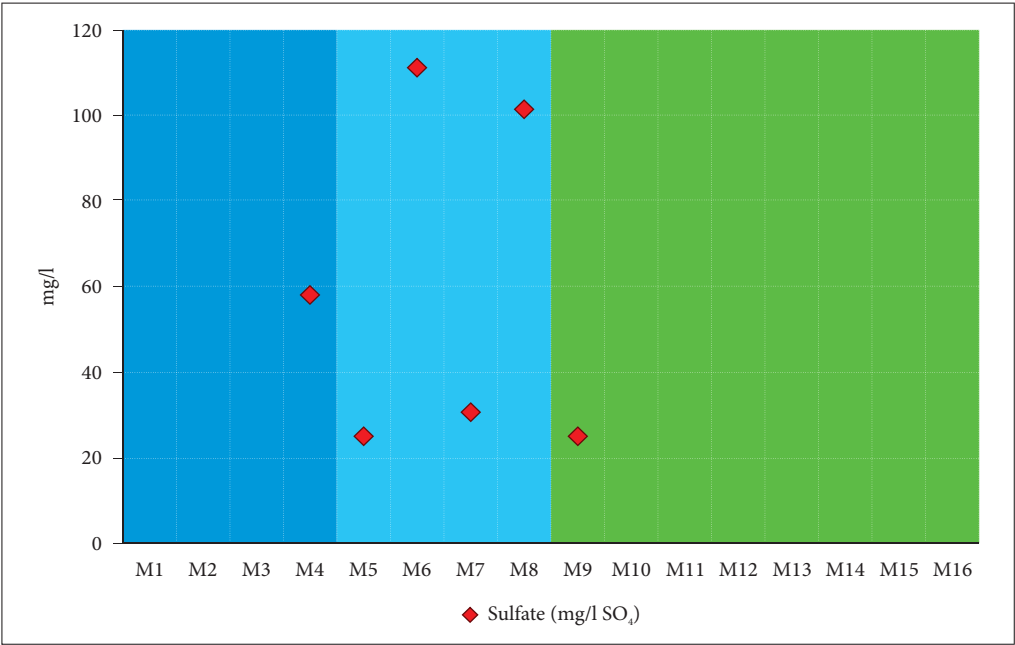


Figure 7: Average value of sulfate at sample sites (The average is calculated only for sample sites where sulfate was detected).

Trbovlje and Hrastnik. In the Boben basin, sulfate concentrations above 25 mg/l, which is the lower detection limit of the test, were only recorded at sample site M4. In the Trboveljščica basin, sulfate was also detected at least once on all sample sites, though concentrations were slightly lower at sample site M8 compared to M6, likely due to the inflow of Bevščica, which had lower sulfate levels. In the Medija basin, sulfate was only detected once, on sample site M9. The measured sulfate concentrations ranged from below 25 mg/l (in most samples) to 150 mg/l at the confluence of Trboveljščica and Sava (sample site M8).

The average oxidation-reduction potential (ORP) values ranged from 93 to 131 mV (Figure 8). The lowest average value was recorded at sample site M1 in the upper reaches of the Brnica. On the Trboveljščica, ORP values slightly decreased downstream, while in the Medija basin, it was highest just before Zagorje, after which it decreased again. Throughout the measurement period, all sample sites showed positive ORP values, indicating that oxidizing conditions prevailed. This suggests that there was sufficient dissolved oxygen in the water to support aerobic decomposition processes.

Overall, the average values for dissolved oxygen and oxygen saturation at all sampling sites were relatively high, ranging from 10.1 to 11.5 mg/l for dissolved oxygen and 97% to 104.7% for oxygen saturation (Figure 9). The differences between individual sample sites were minimal. In the Boben and Trboveljščica basins, dissolved oxygen concentrations decreased downstream. Oxygen saturation also declined downstream in the Boben basin, while in the Trboveljščica basin, it remained largely unchanged. In contrast, in the Medija basin, the dissolved oxygen levels were similar across most sample sites, with a slight increase in oxygen saturation observed downstream.

The average specific electrical conductivity (SEC) values at the sample sites ranged from 323 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 1070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 10). As expected, these values generally increased downstream due to the higher concentration of dissolved electrolytes in the water. In both the Boben and Trboveljščica basins, a significant increase in SEC was observed downstream of the settlements of Trbovlje and Hrastnik. In contrast,

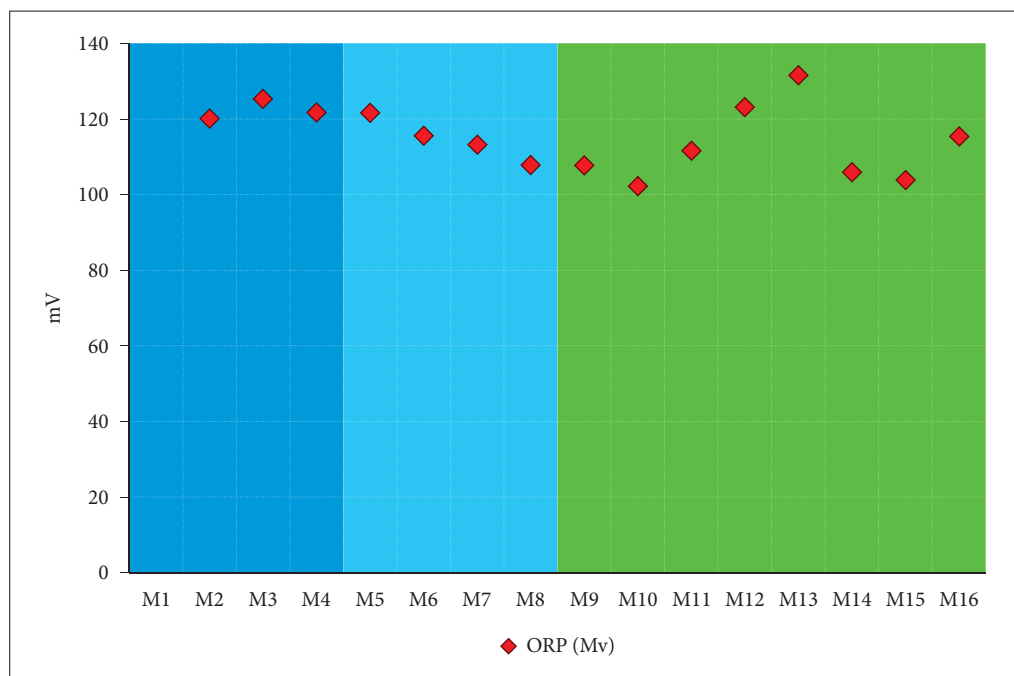


Figure 8: Average value of ORP at sample sites.

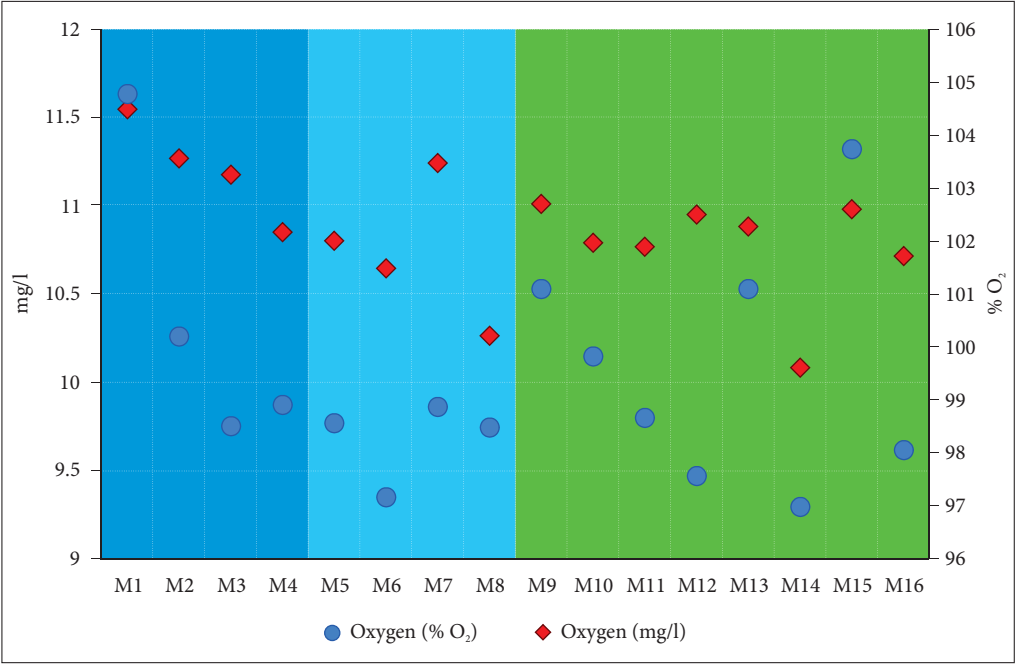


Figure 9: Average water dissolved oxygen and oxygen saturation at sample sites.

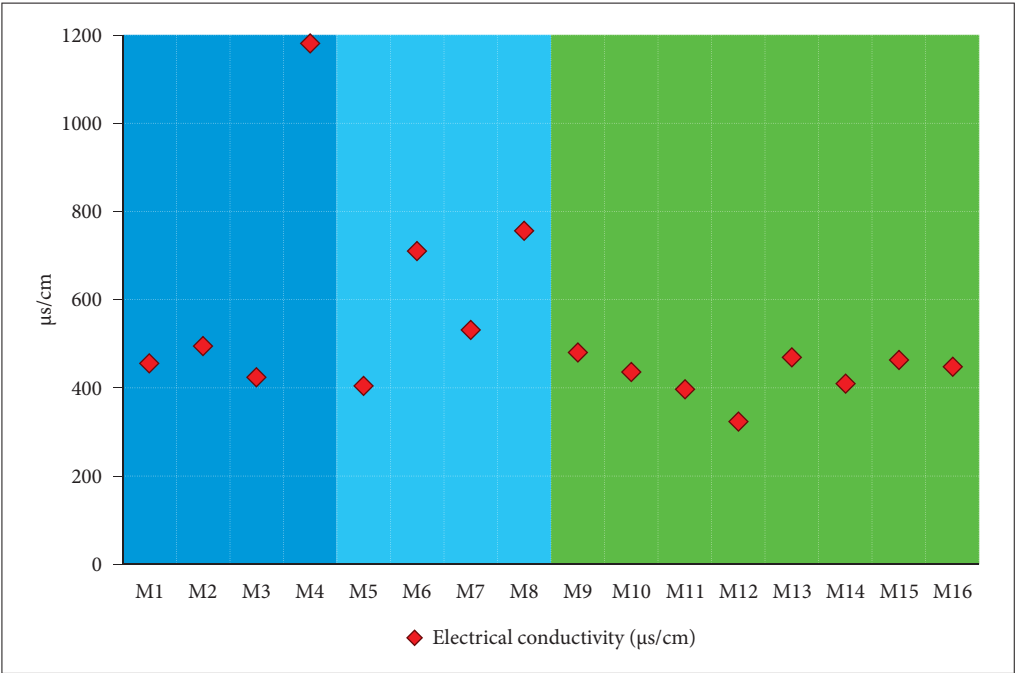


Figure 10: Average value of SEP at sample sites.

in the Medija basin, no notable increase was observed after passing through larger settlements. The most pronounced increase was recorded at sample site M4 in the Boben basin, near its confluence with Sava, where we measured not only the highest average SEP but also the highest individual conductivity value (2264 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

5 Discussion

At the sampling site M1 (the upper stream of Brnica), the values for nitrates were mostly in line with the expected natural background (0 to 5 mg/l). A particularly high value (50 mg/l) was measured only once in the spring, directly after the end of the restriction on the fertilization of agricultural land on March 1 (Uredba o varstvu ... 2009). The value decreased slightly until the sample site M2 (the lower stream of Brnica), but still remained very high (30 mg/l). In the Brnica basin, we also measured higher nitrite values several times, namely in sampling 7 (winter 2021) and 9 (spring 2021), which exceeded the recommended value for nitrite in water (0.01 mg/l). The values of phosphate and chloride were low during the year. The limit value for phosphate (0.15 mg/l) was reached only once. Similarly, chloride values don't show an increased anthropogenic influence. In the Brnica basin (sample sites M1 and M2) the sulfate value was always below the lower limit of the test's measurement range (25 mg/l).

At the sample site M3 (the upper stream of Boben), the values of nitrate, sulfate, chloride and ammonium were below the limit values all the time, and in one measurement the limit value for phosphate was exceeded.

At the sample site M4 (Boben before confluence with Sava), several parameters exceeded the limit values all the time. Large fluctuations in the values of various parameters during the year are also noticeable, which do not correspond to the seasonal dynamics of the content of organic nutrients in the upper stream. The chemical and glass industries are in the area of influence. The stream bed is fully regulated from the confluence of Boben and Brnica to the M4 sampling site and in some places, it flows in a closed channel. Except for three measurements in the winter months (6 (winter 2021), 7 (winter 2021) and 8 (spring 2021)), the chloride values were at the upper limit of the measurement range of the test (60 mg/l). The limit value for nitrates was exceeded only in the eighth measurement (spring 2021), when the nitrate concentration was also elevated at sample sites M1 and M2. The dynamics of changes in the concentration of nitrates at the time is interesting, as it decreases downstream in the Brnica stream (from 50 to 30 mg/l). At the confluence of Boben and Sava we again measured a much higher value (70 mg/l). Nitrite values were also exceeded several times, reaching the upper limit of the measuring range of the test (0.5 mg/l) in three samples. In the second (spring 2020) and third measurement (summer 2020), we measured increased ammonium values (3 mg/l), which exceeded the limit values (1 mg/l) and were at the same time at the upper limit of the measurement range of the test. At each sampling, we also measured high phosphate values at this location, which were at the same time at the upper limit of the test's measurement range (0.25 mg/l). We also detected occasional sulfate pollution. The values reached up to 100 mg/l, which is still below the limit value for sulfate (150 mg/l), but at the same time above the recommended level (15 mg/l). Sulfates were measured in the Boben basin only at sample site M4, so their most likely source is industry. An indicator of pollution is also extremely high SEC values (the average measurement is 1180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and the maximum measured value is 2264 $\mu\text{S}/\text{cm}$), which indicates a significantly increased amount of pollutants that act as electrolytes when dissolved in water. This is significantly above values typical for the electrical conductivity of temperate zone liquid waters, which typically do not exceed 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Boyd 2015). For sample sites M1, M2 and M3 in the Boben headwaters, the main source of pollution is agriculture, as evidenced by the annual dynamics of the nutrients that are washed off agricultural land. With the exception of individual households outside the agglomerated settlements, the settlements are connected to the sewage system, which leads to the Hrastnik municipal sewage treatment plant, which has an outlet downstream of the confluence of the

Boben and Sava rivers and therefore has no influence on the sample sites. For the sample site M4 at the mouth to the Sava, we can conclude that the main source of pollution is industry due to the continuously high values of chlorides, phosphates, SEC, and repeatedly increased values of nitrate, nitrite, ammonium and phosphate. In front of this causal site, right next to the water, there is a chemical products factory (TKI), in which, among other things, phosphates, chlorine products and cleaning products are produced (TKI ... 2021). Most of the waste water produced by TKI is discharged into the Hrastnik municipal treatment plant, while part of the waste water, which contains adsorbable organic halogens, hydrocarbons in the form of mineral oils and free chlorine, flows into Boben. According to ARSO, chlorides, sulfates and ammonium nitrogen produced by the production process at TKI Hrastnik flow into the sewage system, which ends with a municipal treatment plant. According to data on industrial wastewater (ARSO 2021b), the source of sulfates and chloride detected at this sample site may also be the outflow of wastewater from the Trbovlje-Hrastnik Coal Mine.

The amount of pollutants in Trboveljščica generally increases downstream. At sample site M5 (Trboveljščica above Trbovlje), nitrite levels were occasionally elevated in the water. The recommended value (0.01 mg/l) was exceeded at every measurement, most significantly at the third (summer 2020) and fifth (autumn 2020) measurements, where we measured 0.2 mg/l. Higher values occurred in summer. In the first (spring 2020) and second (spring 2020) measurements, we also detected a slightly elevated value of ammonium. Chlorides and nitrates are mostly within the range of values that do not indicate a major anthropogenic influence. The SEC value was always lower at this sample site than at the downstream sample sites M6 and M8, which is probably partly due to the dominance of non-carbonate bedrock in the hinterland, and partly due to the lower overall presence of electrolyte pollutants. Judging by the land use and the increased values of organic nutrients, we can assume that the main source of pollution was agriculture. At sample site M6 (Trboveljščica below Trbovlje) compared to sample site M5, the values of most parameters indicating the presence of pollutants increased. Compared to sample site M5, the chloride content increased, up to 20 mg/l. We measured relatively high nitrate values, which were below the limit value in only three measurements. The values of nitrite were also high, reaching the upper limit of the sensitivity of the test in two thirds of the measurements. Increased levels of phosphate were measured in the water several times. Elevated sulfate values were also measured at each sampling; the highest value was measured at the first sampling (150 mg/l). The main source of pollution is probably inadequately regulated industrial outflows, especially the outflow of industrial water loaded with sulfates from the Trbovlje-Hrastnik Coal Mine. According to official data, the annual amount of sulfate introduced into the watercourse by discharges from the mine in the Trboveljščica basin (5047 kg/year) is less than in the Boben basin (8079 kg/year) (ARSO 2021b), but our measurements do not confirm this, since we measured higher sulfate values in Trboveljščica basin than in Boben basin. A limited influence of households is also possible, since despite 97.7% of households connected to the sewage treatment plant, some areas of the town still do not have sewage connection (ARSO 2021b; Žnidaršič et al. 2021). The area of influence also includes the cardboard packaging production plant and the DINOS landfill with potentially harmful leachate, which, according to ARSO (2021b), is discharged to the Trbovlje treatment plant. At sample site M7, chloride and ammonium values were always below the limit values; ammonium values exceeded the recommended value only in one measurement. Nitrate values exceeded the limit three times. Elevated values for nitrite, when it reached 0.2 mg/l, were measured in one measurement. Since the elevated nitrite content was measured only once in winter, it is most likely the result of leaching from agricultural land. Phosphate levels were also elevated, reaching or exceeding the limit five times (0.15 mg/l). However, we measured relatively low but fairly constant sulfate values around 40 mg/l. The SEC values are slightly higher due to the carbonate background.

At sample site M8 (Trboveljščica before the confluence with Sava), we measured the highest average values for all measured parameters in the Trboveljščica basin. We detected increased chloride values, which reached 40 mg/l in the spring months (measurements 1 (spring 2020) and 9 (spring 2021)). Limit values for nitrate were exceeded in five measurements. Elevated values of nitrites and phosphates were

also common, which in both cases reached the highest value of the measuring range of the test at least in six measurements (0.5 mg/l for nitrite and 0.25 mg/l for phosphate). In two measurements, the ammonium values exceeded the limit value and in one case also the highest value of the measuring range of the test. Sulfate values were slightly lower than at the upstream sampling site M6, which is probably the result of the inflow of Bevščica, which is less loaded with sulfate.

Chloride values in the Medija basin nowhere exceeded 12 mg/l, and the lowest values were generally at the source and in the upper reaches. The same applies to the values of nitrate (with the exception of one measurement at sample site M14 in Orehovica) and phosphate, which were below the limit value at all sample sites, while the highest average values in the basin were at sample site M9. Elevated nitrite values were occasionally measured at sample sites M11 and M14. In the third measurement (summer 2020), 0.3 mg/l of nitrite was measured at sample site M11. At sample site M14, however, the increase occurred in late summer and autumn, when 0.5 mg/l nitrite was measured, which is also the highest value of the test's measuring range. Nitrite is also the only parameter that exceeded the recommended value in several sample locations in the Medija basin. In the fourth measurement (summer 2020), we measured elevated ammonium values at sample sites M 9, M11, M12, M13 and M14. Ammonium was not detected at other sample sites. In this measurement, 3 mg/l of ammonium was measured at sample site M11, which exceeds the limit value and is also the highest value of the measurement range of the test. In the ninth measurement (spring 2021), slightly elevated sulfate values (25 mg/l) were measured before the confluence of the Medija and Sava (M9), which was also the only case when sulfates were detected in the water in the Medija basin. According to the results of the measurements, it is obvious that, in general, the water quality in the Medija basin is better than in the Boben and Trboveljščica basins. According to the measured values of the studied parameters, the main sources of pollution are probably discharges from households that are not connected to the public sewage network, agriculture and, to a lesser extent, industry. 97% of households in the immediate vicinity of Zagorje ob Savi and in the vicinity of Kisovec are connected to a municipal sewage treatment plant. In Izlake, 40% of households are connected to public sewerage, which drains water directly into watercourses. Other settlements do not have a sewage network (Komunala ... 2019; 2021).

The measurement results indicate a significant anthropogenic impact on water quality, especially in the Boben and Trboveljščica basins, where the values of some measured parameters often exceeded both recommended and limit values or were even at the upper limit of the measurement range of the tests used. The latter allows for the possibility that the pollution of Boben and Trboveljščica is actually significantly higher than found. In the upper, less populated part of the basins of both watercourses, the main pressure on the waters is agricultural activity, while in the lower, more densely populated part, mainly sewage from households that are not yet connected to a sewage treatment plant and industries. The measurements carried out confirm that, in accordance with the escalation of pressure on the waters downstream, the quality of Boben and Trboveljščica is also progressively worse. In the Medija basin, the analysis of physico-chemical parameters showed that the influence of anthropogenic pressures on the waters was significantly smaller. The cause is probably the smaller number of industrial plants with burdensome discharges, the lower population density and the approximately three times larger area of the basin and, as a result, the greater flow of water, which affects the more effective dilution of pollutants. Despite this, even in the Medija basin, there is a noticeable increase in the values of some parameters at individual tributaries and in the lower reaches of the Medija, where the pressures on the waters are more concentrated.

In the case of Medija, Trboveljščica and Boben, it has been shown that even smaller, headwater streams that are exempt from regular water quality monitoring can be quite polluted, especially when they flow through larger settlements and industrial areas and are consequently exposed to significant pressures. The latter is a major challenge for the management of such watercourses and at the same time raises the question of the adequacy of existing norms for determining water bodies (Pravilnik ... 2005). The main factor in determining water bodies is the size of the contributing area, which must exceed 100 km²,

while the aspect of existing pressures on the water (except in the part that refers to physical and hydro-morphological changes in the water course) is not considered. Exemption of watercourses from regular monitoring of water quality at the level of the European Union is also addressed by Baattrup-Pedersen et al. (2018), who notes that for comprehensive management of river basins, it is expedient to classify as independent water bodies also those smaller, upstream watercourses that can have a potentially significant negative impact on the water quality of larger water bodies, which also applies to the influence of Boben, Trboveljščica and Medija on the Sava river. Until the end of the 20th century, also due to the aforementioned polluted tributaries, Sava was ranked in the fourth, worst quality class according to the methodology for assessing water quality, and its condition only improved after the modernisation of some industrial plants and the closure of the coal mines in Zasavje region (Cvitanič et al. 2017; Občina ... 2024). If not before, the influence of tributaries on the quality of the Sava will become relevant with the possible construction of a chain of hydroelectric power plants on the middle Sava (mainly the Trbovlje and Suhadolc power plants). These will change the drainage regime of the Sava, reduce its self-purification abilities and increase its water-ecological sensitivity, which will make the river more susceptible to any kind of pollution.

6 Conclusion

Between March 15, 2020 and April 17, 2021, we carried out measurements of selected physico-chemical parameters of water quality in the Medije, Trboveljščica and Boben basins. We performed 9 measurements at 16 sampling sites and in this way gained an insight into the load of the studied watercourses with selected pollutants. We found that the water quality in Boben and Trboveljščica is poor, as the limit and recommended values of the measured parameters were often exceeded there. The state of water quality in the Medija basin is better. In general, due to the increasing pressures, the presence of pollutants increases downstream on all watercourses, and water quality deteriorates. The latter is again more pronounced in Boben and Trboveljščica, where the value of some studied parameters between the upper reaches and the discharge to the Sava increases by tenfold or more, while in Media the downward trend in water quality is less pronounced.

In the upstream of Boben and Trboveljščice, elevated values of physico-chemical parameters indicating the influence of fertilization (nitrate, nitrite, ammonium and phosphate) often appeared in spring and summer, while in the colder part of the year the values were mostly close to the expected natural background. The latter shows the dominant influence of agriculture on water quality, which is mostly seasonal. The main sources of pollution in the lower reaches of Boben and Trboveljščica are most likely industry (especially TKI in Hrastnik, Hrastnik Glassworks, Trbovlje-Hrastnik Mine and some other plants) and households or settlements (mainly washing-off from urban areas and discharge from the Trbovlje water treatment plant). We also detected large fluctuations in the values of some parameters, which can have a negative impact on ecosystems and biodiversity. Pressures on water quality in the Media basin are lower. Occasionally, elevated values of the studied parameters appeared mainly in some tributaries, while at Medija, they occurred only in its lower reaches.

The measurements carried out covered a relatively small number of physico-chemical parameters and are therefore of a distinctly preliminary nature, as a result of which the obtained results cannot in any way replace the results of regular national monitoring and complex assessment of the chemical and ecological status of watercourses. Nevertheless, they provide an insight into the water quality of the studied watercourses and reveal some challenges in managing the Zasavje watercourses. Furthermore, they can serve as a basis for targeted research into sources of pollution and the creation of proposals for measures to improve water quality. To improve the condition of Medija, Trboveljščica and Boben, it would be necessary to better treat the industrial waste water, introduce control over potential unauthorized discharges, connect the remaining households to sewer system and municipal or smaller treatment plants,

reduce and more efficiently use fertilizers on agricultural land, and renaturalize and sustainably manage watercourses to ensure greater self-purification capability. It would also be reasonable to designate the studied watercourses as independent water bodies or a group of water bodies, due to the significant pressures in their basins and their potential impact on the declining quality of the Sava, and to introduce regular monitoring of water quality.

Acknowledgments: This article was prepared within the framework of the research programmes Geography of Slovenia (P6-0101) and Sustainable Regional Development of Slovenia (P6-0229) and the Young Researcher Programme (MR-56874), funded by the Slovenian Research and Innovation Agency.

7 References

- ARSO 2021a: ARHIV – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (15. 4. 2024).
- ARSO 2021b: Emisije v vode iz industrijskih in drugih naprav. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: http://vode.arso.gov.si/dist_javna/izpusti/iskalnik_in.jsp (5. 4. 2024).
- ARSO 2021c: Mesečne statistike. Arhivski hidrološki podatki. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (5. 4. 2024).
- Baatrup-Pedersen, A., Larsen, S. E., Andersen, D. K., Jepsen, N., Nielsen, J., Rasmussen, J. J. 2018: Headwater streams in the EU Water Framework Directive: Evidence-based decision support to select streams for river basin management plans. *Science of the Total Environment* 613-614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.199>
- Basic principles of water analysis. Internet: <https://www.mn-net.com/media/pdf/ba/ea/bb/Textbook-Basic-principles-of-Water-Analysis-EN.pdf> (7. 5. 2024).
- Boyd, C. E. 2015. *Water Quality: An Introduction*. Auburn.
- Breznik, J., Trobec, T. 2022: Poskus ocene kakovosti podtalnice v vodonosniku ob Mislinji. Dela 57. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.57.5-56>
- Buser, S. 1979a: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, tolmač lista Celje. Zvezni geološki zavod. Beograd.
- Buser, S. 1979b: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Celje. Zvezni geološki zavod. Beograd.
- Cvitanič, I., Dobnikar Tehovnik, M., Ambrožič, Š., Grbovič, J., Jesenovec, B., Kolenc, A., Kozak Legiša, Š., Mihorko, P., Rotar, B. 2008: Monitoring kakovosti površinskih vodotokov v Sloveniji v letu 2006. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: https://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Porocilo_reke_2006.pdf (7. 5. 2021).
- Cvitanič, I., Jesenovec, B., Kuhar, U., Rotar, B., Sever, M. 2013: Ocena stanja rek v Sloveniji v letu 2011. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: <https://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Poro%C4%8Dilo%20REKE%202011.pdf> (5. 5. 2024).
- Cvitanič, I., Jesenovec, B., Dobnikar Tehovnik, M., Dolinar, N., Kuhar, U., Sodja, E. 2017: Ocena stanja vodotokov v Sloveniji. Poročili za leti 2014 in 2015. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: https://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Poro%C4%8Dilo%20REKE%20_2014%20in%202015_SPLET%20kon%C4%8Dna.pdf (7. 5. 2024).
- Cvitanič, I., Dobnikar Tehovnik, M., Gacin, M., Jesenovec, B., Poje, M., Sodja, E., Velikonja Martinčič, M. 2022: Kemijsko stanje površinskih voda v Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/ARSO/Vode/Stanje-voda/Porocilo-o-kemijskem-stanju-povrsinskih-voda-za-letu-2022.pdf> (7. 5. 2024).
- Dobnikar Tehovnik, M., Cvitanič, I., Gacin, M., Jesenovec, B., Mihorko, P., Poje, M., Sodja, E., Dolinar, N., Gabrijelčič, E., Krivograd Klemenčič, A., Kuhar, U., Muc, T., Peternel, A., Remec-Rekar, Š., Rotar, B., Štupnikar, N., Ulaga, F. 2022: Program monitoringa kemijskega in ekološkega stanja voda.

- Program za obdobje 2022 do 2027. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Internet: <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/ARSO/Vode/Stanje-voda/Program-monitoringa-voda-2022-do-2027.pdf> (7. 5. 2024).
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Internet: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj> (10. 10. 2024).
- Frantar, P., Hrvatini, M. 2005: Pretočni režimi v Sloveniji med letoma 1971 in 2000. *Geografski vestnik* 77-2.
- Jarvie, H. P., Withers, P. J. A., Hodgkinson, R., Bates, A., Neal, M., Wickham, H. D., Harman, S. A., Armstrong, L. 2008: Influence of rural land use on streamwater nutrients and their ecological significance. *Journal of Hydrology* 350, 3-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.042>
- Klabus, A. 1995: Neurje 28. in 29. junija v Zasavju. *Ujma* 9.
- Komunala Zagorje 2019: Elaborat o oblikovanju cen storitev obvezne občinske gospodarske javne službe varstva okolja: Odvajanje komunalne in padavinske odpadne vode. Zagorje ob Savi. Internet: https://www.komunala-zagorje.si/images/PDF/elaborati/2019/3___ELABORAT___ODVAJA-NJE___KOMUNAL___ODP_VODE_2019.pdf (24. 4. 2024).
- Komunala Zagorje 2021: Priključenost na komunalno čistilno napravo. Osební vir, 28. 5. 2021.
- Kovačič, G., Rupnik, T. 2015: Rakiški stržen: hidrogeografske značilnosti in ocena kakovostnega stanja. *Geografski vestnik* 87-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV87103>
- Kovačič, G., Rupnik, T. 2019: Kakovostno stanje Rakiškega stržena po obnovi centralne čistilne naprave Postojna. *Geografski vestnik* 91-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV91203>
- Meybeck, M., Peters, N. E., Chapman, D. V. 2005: Water quality. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa093>
- MKGP 2021: Raba. Grafični podatki RABA za celo Slovenijo. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana. Internet: <https://rkg.gov.si/vstop> (5. 5. 2024).
- Nacionalni inštitut za javno zdravje: O posameznih parametrih na kratko. Internet: <https://nijz.si/moje-okolje/pitna-voda/o-posameznih-parametrih-na-kratko/> (16. 1. 2024).
- Nguyen, C. T. T., Cai, Y. 2019: Physicochemical characteristics of streams in Bukit Timah Nature Reserve, Singapore. *Gardens' Bulletin Singapore* 71-1. DOI: [https://doi.org/10.26492/gbs71\(suppl.1\).2019-20](https://doi.org/10.26492/gbs71(suppl.1).2019-20)
- Občina Zagorje ob Savi 2024: Načrt zaščite in reševanja v primeru poplav v občini Zagorje ob Savi. Internet: <https://www.zagorje.si/DownloadFile?id=698195> (10. 4. 2024).
- Pantelić, M., Dolinaj, D., Savić, S., Milošević, D., Obradović, S., Leščešen, I., Ogrin, M., Ogrin, D., Glojek, K., Trobec, T. 2022: Physical-chemical water quality study of the Sava River in Serbia using the statistical and factor analysis. *Water Resources* 49-6. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807822060136>
- Pravilnik o določitvi in razvrstitvi vodnih teles površinskih voda. Uradni list Republike Slovenije 63/2005. Ljubljana.
- Prebivalstvo po starosti in spolu, občine, Slovenija, polletno 2021: Si-STAT podatkovni portal. Statistični urad Republike Slovenije. Ljubljana. Internet: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/05C4003S.px> (25. 5. 2021).
- Regionalni razvojni program Zasavske regije 2021–2027. Regionalna razvojna agencija Zasavje. Zagorje ob Savi, 2022. Internet: https://www.gov.si/assets/ministrstva/MKRR/DRR/RRP-2021_2027/RRP-Zasavske-razvojne-regije.pdf (1. 3. 2024).
- Rusjan, S. 2008: Hidrološke kontrole sproščanja hranil v porečjih. Doktorsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Štaut, L. 2021: Analiza kakovosti vode na izbranih vodotokih v Zasavju. Magistrsko delo, Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Tahir, A. J., Špendl, R., Drašler, D., Matičič, M. 2009: Program varstva okolja občine Trbovlje. Trbovlje. Internet: http://www.lex-localis.info/files/18530ea2-130e-422b-a3f3-91c3ce40edaa/634419198960000000_OPVO_Trbovlje.pdf (10. 10. 2024).

- TKI Hrastnik, d. d. 2021: Proizvodi. Internet: <https://tki.si/proizvodi/> (5. 4. 2024).
- Trobec, T. 2008: Hidrogeografske metode ocenjevanja nemerjenih obdobjnih pretokov v Sloveniji. Dela 29. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.29.119-130>
- Trobec, T. 2011: Vodogradbeni protipoplavni ukrepi za varstvo pred škodljivim delovanjem hudourniških poplav kot sestavni del obvladovanja poplavnega tveganja. Dela 35. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.35.103-124>
- Trobec, T. 2017: Hidrogeografske značilnosti. Kamniška Bistrica – geografska podoba gorske doline. GeograFF 22. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.4312/9789610600091>
- Trobec, T. 2019: Hidrogeografske značilnosti Jezerskega. Fizična geografija Jezerskega z dolino Kokre. GeograFF 24. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.4312/9789610601890>
- Trobec, T. 2022: Hidrogeografske značilnosti. Geografski oris občine Loški Potok. GeograFF 25. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.4312/9789610605584>
- Urbanič, G., Toman, M. J. 2003: Varstvo celinskih voda. Ljubljana.
- Uredba o kakovosti površinskih voda za življenje sladkovodnih vrst rib. Uradni list Republike Slovenije 46/2002. Ljubljana.
- Uredba o stanju površinskih voda. Uradni list Republike Slovenije 14/2009. Ljubljana.
- Uredba o varstvu voda pred onesnaževanjem z nitrati iz kmetijskih virov. Uradni list Republike Slovenije 113/2009. Ljubljana.
- Yue, F., Waldron, S., Li, S., Wang, Z., Zeng, J., Xu, S., Zhang, Z., Oliver, D. M. 2019: Land use interacts with changes in catchment hydrology to generate chronic nitrate pollution in karst waters and strong seasonality in excess nitrate export. Science of the Total Environment 696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134062>
- Zakon o varstvu okolja. Uradni list Republike Slovenije 44/2022. Ljubljana.
- Zakon o vodah. Uradni list Republike Slovenije 67/2002. Ljubljana.
- Žnidaršič, M., Trotovšek, T., Petek, D., Dolar, T., Fakin, R., Knez, L., Mravlje, J., Gračnar, A., Krajnik, R., Beravs, A., Princ, G., Drugovič, S., Cestnik, L., Radič, T., Medvešek Crnkovič, V. 2021: Letno poročilo 2020: Komunala Trbovlje. Trbovlje. Internet: <https://www.komunala-trbovlje.si/uploads/FOTO%20MATERIALI/Letno%20poro%C4%8Dilo/Letno%20poro%C4%8Dilo%202020%20komplet.pdf> (5. 10. 2021).

KAKOVOST VODE IZBRANIH VODOTOKOV V ZASAVJU

1 Uvod

Kakovost vode je odraz njenih fizikalnih, kemijskih in bioloških značilnosti, ki se vrednotijo glede na pojavno obliko vode (na primer reke, jezera, podzemne vode) ali vrsto rabe (na primer pitna voda, industrijska voda, voda za namakanje) (Dobnikar Tehovnik s sodelavci 2022). Na slabšo kakovost vode vplivajo predvsem najrazličnejši antropogeni pritiski, ki jih povzročajo kmetijstvo, poselitve in urbanizacija, industrija, proizvodnja energije, turizem in druge dejavnosti (Meybeck, Peters in Chapman 2005). Tekoče površinske vode morajo biti v dobrem kemijskem in ekološkem stanju, kar v Evropski uniji opredeljuje Vodna direktiva (Directive ... 2000), v Sloveniji pa Uredba o stanju površinskih voda (Uredba o stanju ... 2009). Kemijsko stanje vodnih teles se ocenjuje glede na vsebnost 45 snovi ali skupin snovi opredeljenih kot prednostne snovi ter osem drugih onesnaževal, ekološko pa glede na odmik ekosistemov od naravnega stanja, in sicer glede na izbrane fizikalno-kemijske, biološke ter hidromorfološke elemente kakovosti. Kakovost vode pa je možno ocenjevati tudi z analizo smotno izbranih fizikalno-kemijskih parametrov, kot so na primer vsebnost različnih hranil, pH, specifična električna prevodnost, biokemijska in kemijska potreba po kisiku (Urbanič in Toman 2003; Boyd 2015; Pantelić s sodelavci 2022).

Monitoring stanja voda v Sloveniji izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) na podlagi Zakona o vodah (2002) in Zakona o varstvu okolja (2022) ter v skladu s programom monitoringa za petletna obdobja (Dobnikar Tehovnik s sodelavci 2022). Izvaja se na večjih vodotokih oziroma njihovih odsekih, tako imenovanih vodnih telesih (Pravilnik ... 2005), ter na območjih, kjer se voda odvzema za oskrbo s pitno vodo, medtem ko so izvzeti manjši, povirni vodotoki nižjega reda, čeprav predstavljajo večino rečne mreže. Vodna telesa površinskih voda so določena za vodotoke s prispevno površino večjo od 100 km², naravna jezera s površino vodne gladine, večjo od 0,5 km², morja in somornice, umetne kanale, daljše od 3 km ter vodne zadrževalnike na rekah in umetne ojezeritve s površino gladine, večjo od 0,5 km². Po nekaterih ocenah (Baattrup-Pedersen s sodelavci 2018) so povirna območja na 58 % evropske celine, stanje pa je zaradi izrazito povirnega značaja Slovenije podobno tudi pri nas (Trobeč 2011). Zaradi velike naravno- in družbenogeografske pestrosti teh porečij imajo vodotoki pogosto zelo različne fizikalno-kemijske, hidromorfološke in druge lastnosti (Baattrup-Pedersen s sodelavci 2018; Trobec 2019).

Številni avtorji v Sloveniji in tujini so se na podlagi analize izbranih fizikalno-kemijskih parametrov ukvarjali s preučevanjem kakovosti voda manjših, povirnih vodotokov nižjega reda. Rusjan (2008) je preučeval časovno dinamiko sproščanja hranil na območju potoka Padež. Kovačič in Rupnik (2015; 2019) sta preučevala kakovost vode Rakiškega stržena. Na območju Kamniške Bistrice, Jezerskega in Loškega potoka je s podobno metodo kot v naši raziskavi kakovost ugotavljal Trobec (2017; 2019; 2022), ki je vzorčil vodotoke, na katerih ni uradnega monitoringa kakovosti voda. Breznik in Trobec (2022) sta preučevala kakovost podtalnice v vodonosniku ob Mislinji, ki ravno tako ni vključen v uradni monitoring kakovosti voda. Jarvie s sodelavci (2008) so preučevali koncentracije dušikovih in fosforjevih spojin v porečjih rek Wye in Avon v Veliki Britaniji. S podobno tematiko se je ukvarjal tudi Yue s sodelavci (2019), ko so spremljali onesnaženost kraških vodonosnikov z nitrati in vpliv različne rabe zemljišč na količino onesnaževal. Nguyen in Cai (2019) pa sta z analizo podobnih parametrov kot v naši raziskavi spremljala kakovost površinskih in podzemnih voda v okolici Singapurja.

Sava ima na območju Zasavja več manjših pritokov. Med njimi po vodnatosti in dolžini toka izstopajo Medija, Trboveljščica in Boben. Zaradi majhnih vodozbirnih zaledij in skromne vodnatosti se ti vodotoki ne uvrščajo med t. i. vodna telesa (Pravilnik ... 2005), zato so izvzeti iz rednega monitoringa kakovosti voda ter ocenjevanja kemijskega in ekološkega stanja voda, zaradi česar tudi ne poznamo

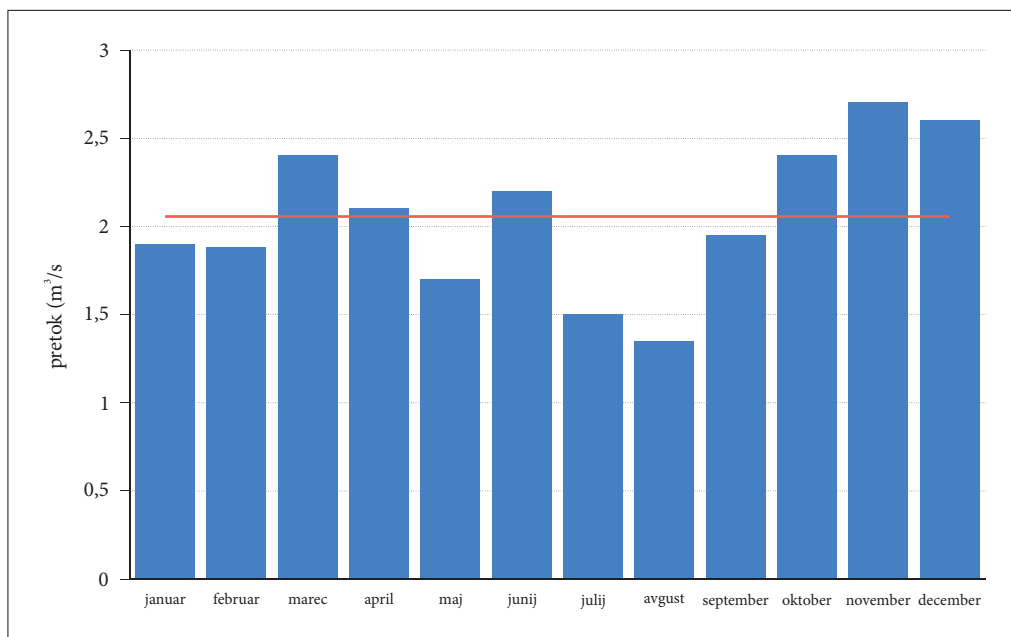
njihove kakovosti. Za zasavske vodotoke je (razen za Savo) na voljo zelo malo podatkov in raziskav o kakovosti vode. Delno je problematika onesnaženosti zasavskih vodotokov obravnavana v Programu varstva okolja občine Trbovlje (Tahir s sodelavci 2009), kjer so zbrani podatki o količini izpustov odpadnih voda v Trboveljščico in Savo. Leta 2006 je ARSO v monitoringu kakovosti površinskih vodotokov v Sloveniji zaznal povišane vrednosti fosfata dolvodno od sotočja Bobna in Save ter kot verjetni vir onesnaženja navedel Tovarno kemičnih izdelkov (TKI) v Hrastniku (Cvitanč s sodelavci 2008). V preiskovalnem monitoringu so leta 2009 merili vsebnost živega srebra v porečjih Bobna in Trboveljščice ter ugotovili povišane vrednosti na izlivu Bobna v Savo, kar naj bi bila posledica starega bremena oziroma resuspenzije živega srebra iz sedimenta in ne posledica aktualnih emisij TKI (Cvitanč s sodelavci 2013). Zaradi povišanih vrednosti so uvedli redni monitoring živega srebra na izlivu Bobna v Savo, kjer vrednosti za ta parameter že vrsto let ostajajo presežene (Cvitanč s sodelavci 2022).

Zaradi velike gostote poselitve, gospodarske usmerjenosti območja v industrijsko in rudarsko dejavnost, antropogene preoblikovanosti strug, skromnih samočistilnih sposobnosti in velike vodno-ekološke občutljivosti predvidevamo, da so pritiski na kakovost Medije, Trboveljščice in Bobna veliki. Zaradi teh razlogov je pomembno, da poznamo kakovost njihovih voda. Ti vodotoki so poleg tega pomembni za ohranjanje biotske pestrosti in kakovost Save v srednjem toku. V raziskavi smo na Mediji, Trboveljščici in Bobnu na 16 lokacijah v obdobju enega leta izvedli 9 cikličnih vzorčenj in analizirali izbrane fizikalno-kemijske parametre kakovosti vode. Na izbranih lokacijah smo na podlagi meritev ter preseganj priporočenih in mejnih vrednosti ocenili kakovost vode.

2 Preučevano območje

Preučevano območje, ki ga odmakajo Medija, Trboveljščica in Boben ter njihovi pritoki Brnica, Bevščica, Kotredrščica in Orehovica, je v zasavski statistični regiji (občine Hrastnik, Trbovlje in Zagorje ob Savi), severno od Save (slika 2). Njegova površina je 153,9 km². Glavnino območja predstavlja porečje Medije (97,5 km²), porečji Bobna in Trboveljščice pa merita 30,8 km² oziroma 25,5 km². Območje v povprečju prejme med 1200 in 1400 mm padavin (ARSO 2021a). Porečja preučevanih vodotokov ležijo med 210 in 1203 m nadmorske višine. Geološka sestava porečij Bobna in Trboveljščice je podobna. Povirni del je večinoma iz nekarbonatnih kamnin (glinovci, peščenjaki in konglomerati), v srednjem in spodnjem delu porečja pa prevladujejo karbonatne kamnine. Zaradi večje površine ima porečje Medije nekoliko bolj raznovrstno geološko zgradbo. V povirju in zgornjem toku prevladujejo karbonatne kamnine (dolomit in litotamnijski apnenec), v srednjem toku, v okolici naselja Kisovec so nekarbonatne kamnine (peski in peščenjaki), nato pa vse do sotočja s Savo ponovno karbonatne kamnine (apnenec in dolomit) (Buser 1979a; 1979b). Sodeč po podatkih vodomerne postaje Zagorje na Mediji za obdobje 1981–2010 imajo preučevani vodotoki dežno-snežni rečni pretočni režim z izrazitim jesenskim viškom in poletnim nižkom (slika 1; Frantar in Hrvatinić 2005). Povprečni obdobjni pretok (sQs) je na Mediji pri Zagorju 2,1 m³/s, specifični odtok (q) pa 22,5 l/(s×km²) (ARSO 2021c), kar je bilo nekoliko pod slovenskim povprečjem (27 l/(s×km²)). Glede na pretočne vrednosti Medije in razmerje v velikosti porečij (Trobec 2008) sQs Bobna in Trboveljščice na izlivu v Savo ocenjujemo na 0,7 m³/s oziroma 0,6 m³/s.

V občinah Hrastnik, Trbovlje in Zagorje ob Savi živi 41.461 prebivalec. Gostota poselitve je 180 prebivalcev/km², kar je znatno nad slovenskim povprečjem. Večina jih živi v treh občinskih središčih na dnu dolin. Največje število prebivalcev ima občina Zagorje ob Savi (16.379), sledi občina Trbovlje (16.024) in Hrastnik (9058) (Prebivalstvo ... 2021). Gospodarstvo na preučevanem območju je kljub prestrukturiranju v zadnjem desetletju še vedno močno usmerjeno v industrijo, ki je obremenjujoča za okolje; nekateri obrati so tik ob preučevanih vodotokih (Regionalni ... 2022). Večina odpadne vode iz industrije se po podatkih ARSO (2021b) odvaja v čistilne naprave v vsaki od preučevanih občin. Prevladujoča raba zemljišč v preučevanih porečjih je gozd, ki povsod obsega več kot polovico zemljišč. Sledijo travniki in pozidana zemljišča. Slednja največji delež (18,5 %) zasedajo v porečju Trboveljščice



Slika 1: Hidrogram Medije pri Zagorju za obdobje 1981–2010 (vir podatkov: ARSO 2021c).

(MKGP 2021). Preučevani vodotoki so hudourniški. Zaradi hitrega odziva na padavine in pozidave na poplavnih območjih so na izpostavljenih mestih regulirani in močno preoblikovani (Klabus 1995).

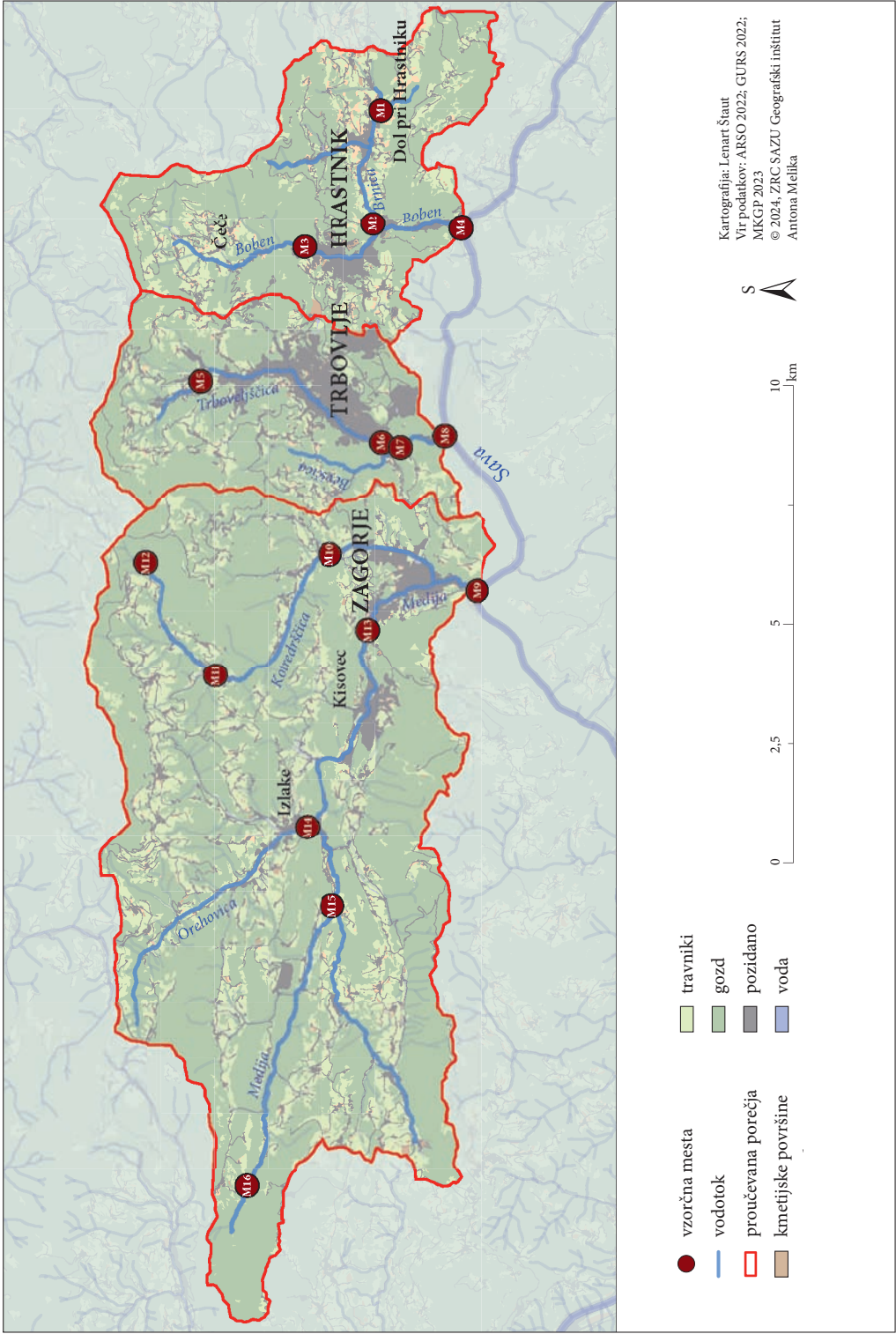
3 Metodologija

Izhajajoč iz značilnosti rečne mreže ter naravno- in družbenogeografskih lastnosti območja smo na vodotokih in njihovih pritokih izbrali 16 vzorčnih mest, s katerimi smo poskušali zajeti tako razlike v geografsko pogojeni pestrosti prispevnih območij kot tudi potencialne vplive pomembnejših pričakovanih virov obremenjevanja voda, na primer: kemična in steklarska industrija v Hrastniku, vpliv večjih naselij (Trbovlje in Zagorje), vplive kmetijstva v zgornjem toku vodotokov. V porečjih Bobna in Trboveljščice smo vzorčili na štirih lokacijah, v porečju Medije pa na osmih (sliki 2 in 3; preglednica 1) (Štaut 2021).

Meritve smo izvajali v obdobju med 15. marcem 2020 in 17. aprilom 2021, ko smo izvedli 9 vzorčenj (preglednica 2). Enoletno obdobje vzorčenj in analiz vode omogoča preliminarne vpogled v sezonsko spreminjanje vrednosti merjenih fizikalno-kemijskih parametrov na izbranih vodotokih. Zaradi ukrepov preprečevanja širjenja Covid19 (omejenost gibanja na meje občine bivanja) in omejenega dostopa do laboratorija smo namesto sprva načrtovanih 12, izvedli le 9 meritev. Vzorce smo pobirali v dopoldanskem času, ob nizkem vodostaju, vsaj teden po dežju. Vzorce smo do izvedbe laboratorijskih analiz kasneje istega dne hranili v hladnem in temnem prostoru. Z več parametrskim merilcem smo izvedli meritve na samem mestu vzorčenja, ostale analize pa v laboratoriju.

Merili smo 11 parametrov: temperatura (°C), pH, nitrat (mg/l NO_3^-), nitrit (mg/l NO_2^-), fosfat ($\text{mg/l PO}_4\text{-P}$), sulfat (mg/l SO_4^{2-}), klorid (mg/L Cl^-), amonij (mg/l NH_4^+), oksidacijsko-redukcijski

Slika 2: Pregledni zemljevid preučevanega območja z vzročnimi mesti. ► str. 52



potencial (mV ORP), vsebnost kisika (mg/l O₂) in nasičenost kisika v vodi (% O₂) ter specifična električna prevodnost (μS/cm SEP). Za merjenje nitrata, nitrita, klorida, amonija, in sulfata smo uporabili kolorimetrične in titracijske teste *VISOCOLOR ECO*, za merjenje fosfata pa visoko občutljiv test *VISOCOLOR HE* proizvajalca Macherey-Nagel. Terenske meritve pH, specifične električne prevodnosti (SEP), vsebnosti in nasičenosti kisika ter oksidacijsko-redukcijskega potenciala (ORP) smo opravili z več parametrskim merilcem *Hanna HI98196*.

Slovenija ima v različnih dokumentih določene priporočene in mejne vrednosti za večino merjenih parametrov (Uredba o kakovosti ... 2002; Uredba o stanju ... 2009; Nacionalni ... 2024), na katere smo se opirali pri vrednotenju rezultatov (preglednica 3). Za mejne vrednosti, ki v Sloveniji niso določene (fosfat, električna prevodnost), smo uporabili podatke iz tujine (Boyd 2015; Basic ... 2021). Pri nitratu in sulfatu smo kot mejne vrednosti upoštevali mejne vrednosti za doseganje dobrega ekološkega stanja, kot priporočene vrednosti pa mejne vrednosti za doseganje zelo dobrega ekološkega stanja voda. Pri nitratu, amoniju, pH in vsebnosti kisika smo glede na povirni značaj analiziranih vodotokov za

Preglednica 1: Vzorčna mesta (barve ustrezajo barvam na slikah 4–10: temnomodra – porečje Bobna, svetlomodra – porečje Trboveljščice, zelena – porečje Medije).

vzorčno mesto	ime vzorčnega mesta
M1	zgornji tok Brnice
M2	spodnji tok Brnice
M3	zgornji tok Bobna
M4	Boben pred izlivom v Savo
M5	Trboveljščica zgornji tok
M6	Trboveljščica pod Trbovljami
M7	Bevščica nad sotočjem s Trboveljščico
M8	Trboveljščica pred izlivom v Savo
M9	Medija pred izlivom v Savo
M10	Kotredrščica nad Zagorjem
M11	Kotredrščica srednji tok
M12	Kotredrščica izvir
M13	Medija nad Zagorjem
M14	Orehovica nad sotočjem z Medijo
M15	Medija po sotočju s Kanderšico
M16	Medija izvir

Preglednica 2: Datumi vzorčenja glede na meteorološke letne čase.

leto	zima	pomlad	poletje	jesen
2020		15. marec 22. april	28. junij 27. julij	21. september
2021	23. december 12. februar	7. marec 17. april		

priporočene in mejne vrednosti privzeli tiste, ki veljajo za salmonidne vode. Pri določanju ključnih virov onesnaževanja smo se opirli na teoretske osnove preučevanja kakovosti voda na podlagi analize izbranih fizikalno-kemijskih parametrov vode (na primer: Urbanič in Toman 2003; Boyd 2015).



LENART ŠTAUT

Slika 3: Vzorčno mesto (M8) na Trboveljščici pred izlivom v Savo.

*Preglednica 3: Priporočene in mejne vrednosti parametrov (*podatek velja za vrednosti v pitni vodi, zato ga pri vrednotenju kakovosti nismo upoštevali; **empirično ocenjena vrednost na podlagi različnih virov) (Viri podatkov: ⁽¹⁾Uredba o kakovosti ... 2002; ⁽²⁾Uredba o stanju ... 2009; ⁽³⁾Boyd 2015; ⁽⁴⁾Basic ... 2021; ⁽⁵⁾Nacionalni ... 2024).*

parameter	naravno ozadje	priporočena vrednost	mejna vrednost	merilno območje testov	enota
nitrat	5 ⁽²⁾	7 ⁽²⁾	9,5 ⁽²⁾	0–120	mg/l NO ₃ ⁻
nitrit	blizu 0 ^(3,4)	0,01 ⁽¹⁾	/	0–0,5	mg/l NO ₂ ⁻
klorid	nekaj mg/l ⁽³⁾	250 ^{(5)*}	/	0–60	mg/l Cl ⁻
fosfat	0,01 ^(1,4)	/	0,15**	0–0,25	mg/l PO ₄ -P
sulfat	nekaj mg/l ⁽³⁾	15 ⁽²⁾	150 ⁽²⁾	25–200	mg/l SO ₄ ²⁻
amonij	0,02 ⁽³⁾	0,04 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	0–3	mg/l NH ₄ ⁺
pH	/	6–9 ⁽¹⁾	/	0–14	/
vsebnost kisika	/	≥ 7 (100 % meritev) in ≥ 9 (50 % meritev) ⁽²⁾	≥ 6 (100 % meritev) in ≥ 9 (50 % meritev) ⁽²⁾	/	mg/l O ₂
SEP	500 ⁽³⁾	/	/	0–10.000	μS/cm

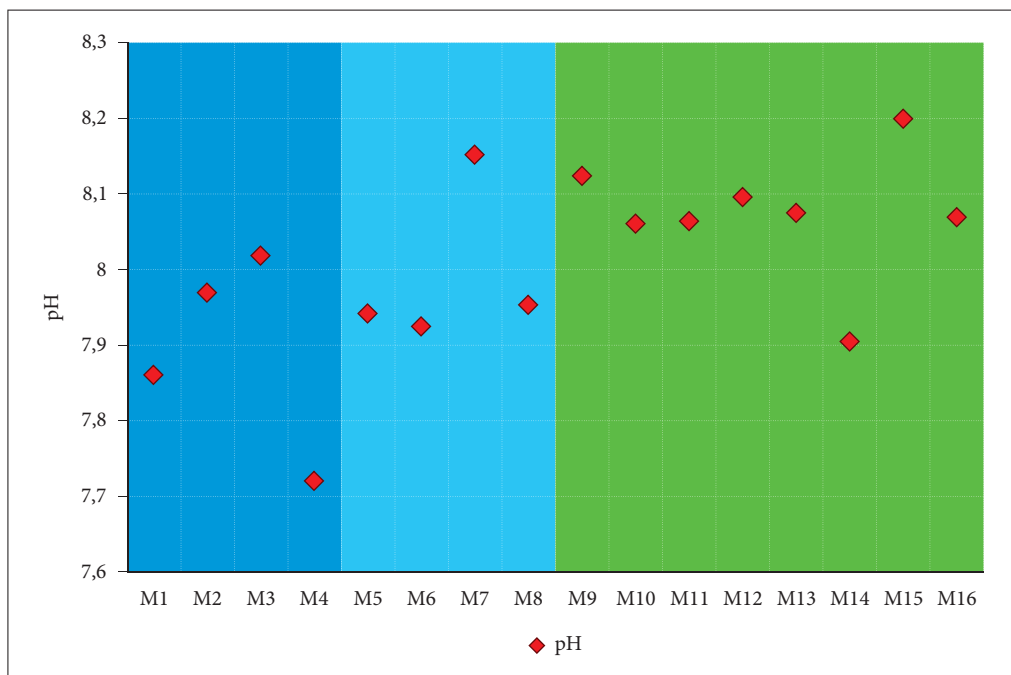
4 Rezultati

Rezultati vzorčenj so prikazani s povprečnimi vrednostmi na posameznem vzorčnem mestu, navedene pa so tudi izstopajoče vrednosti posameznih parametrov. Povprečne vrednosti pH so znotraj porečji podobne in se gibljejo na med 7,7 in 8,2 (slika 4). Vse meritve razen ene kažejo na bazično vodo. Najvišjo vrednost pH (8,54) smo izmerili na izlivu Medije v Savo (vzorčno mesto M9), najnižjo (6,61) pa na izlivu Bobna v Savo (vzorčno mesto M4).

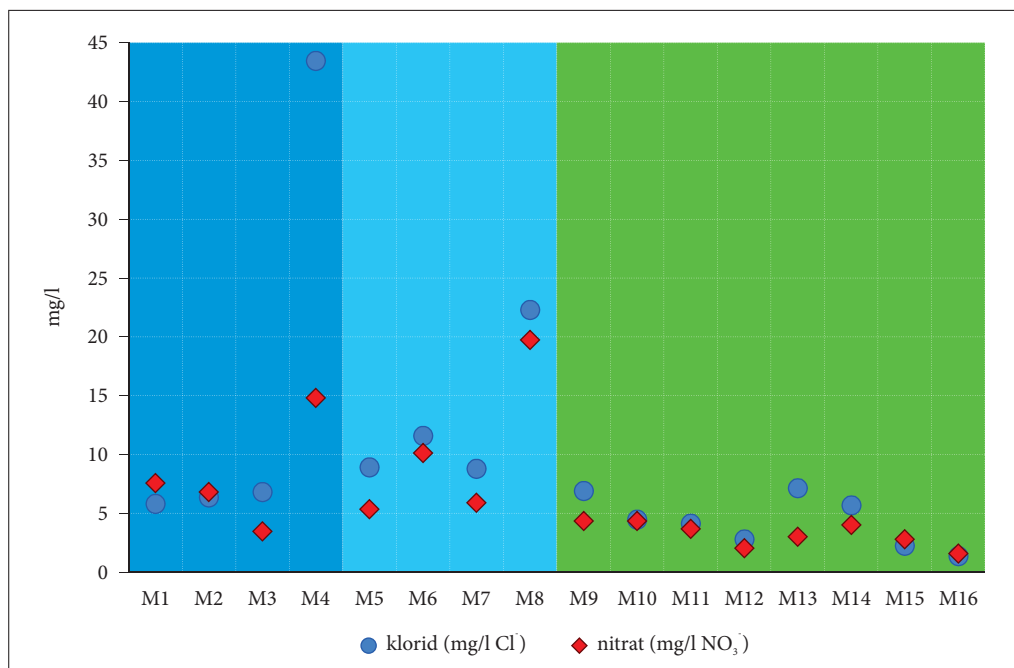
Vrednosti klorida se v splošnem povečujejo po toku navzdol. Najizraziteje je to opazno na Bobnu in Trboveljščici dolvodno od naselij Hrastnik in Trbovlje (slika 5). Vrednosti naraščajo tudi na Mediji, vendar manj izrazito. Najvišjo povprečno (43,4 mg/l) in absolutno vrednost (60 mg/l) klorida, ki je bila hkrati tudi na zgornji meji merilnega območja testa, smo izmerili na Bobnu pred izlivom v Savo (vzorčno mesto M4).

Podoben potek naraščanja vrednosti po toku navzdol opazimo tudi pri nitratu (slika 5). Za Boben in Trboveljščico je značilno izrazito povečanje vrednosti dolvodno od naselij Hrastnik in Trbovlje. Najvišjo vrednost (70 mg/l) smo izmerili na vzorčnem mestu M4. Najnižje vrednosti smo izmerili v porečju Medije, kjer so bile te na izviru pri treh vzorčenjih celo manjše od občutljivosti testa (1 mg/l), sicer pa v povprečju večinoma znotraj pričakovanega naravnega ozadja.

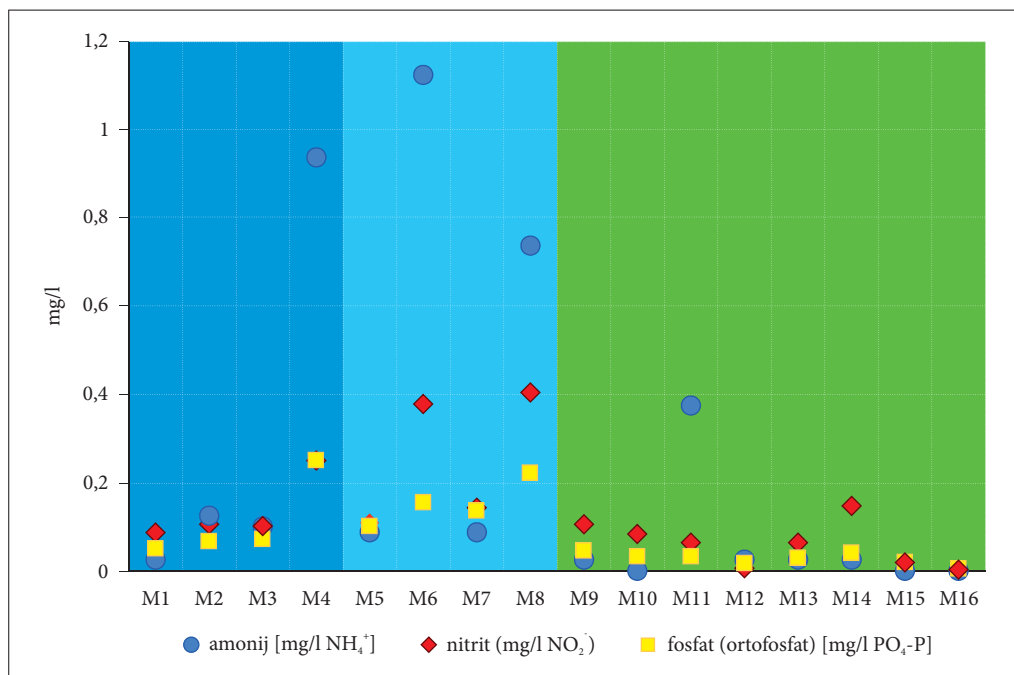
Povprečne vrednosti nitrita, amonija in fosfata (slika 6) se na Bobnu in Trboveljščici gibljejo podobno, saj v obeh primerih pride do izrazitega povečanja dolvodno od naselij Hrastnik in Trbovlje. Vrednosti amonija na Trboveljščici med Trbovljami in izlivom v Savo (vzorčni mesti M6 in M8), nekoliko upadejo, medtem ko na Bobnu opazimo močno povečanje amonija in fosfata na izlivu v Savo (vzorčno mesto M4), kjer so bile izmerjene vrednosti pri fosfatu ob vseh meritvah na zgornji meji merilnega območja testov (0,25 mg/l). V porečju Trboveljščice so se vrednosti nitrita med vzorčnima mestoma M6 in M8, kljub pritoku z nitriti manj obremenjene Bevščice, povečale. Rahlo povečanje vrednosti po toku



Slika 4: Povprečne vrednosti pH na vzorčnih mestih.



Slika 5: Povprečne vrednosti klorida in nitrata na vzorčnih mestih.



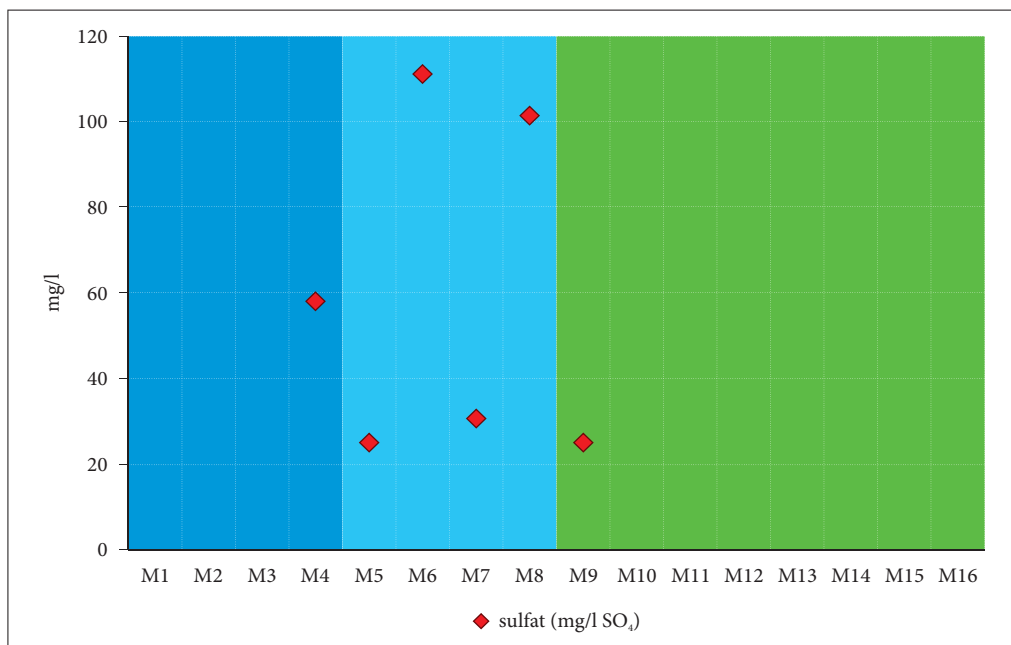
Slika 6: Povprečne vrednosti nitrita, amonija in fosfata na vzorčnih mestih.

navzdol smo zaznali tudi na Mediji. Najvišje povprečne vrednosti nitrita (0,46 in 0,43 mg/l) so bile na Trboveljščici na vzorčnih mestih M6 in M8, kjer so bile posamezne vrednosti večkrat na zgornji meji merilnega območja testa (0,5 mg/l). Takšne vrednosti nitrita smo občasno izmerili tudi v porečju Bobna. Podobno je tudi pri amoniju, kjer smo najvišje vrednosti, ki so hkrati tudi zgornja meja občutljivosti testa (3 mg/l), izmerili na vzorčnih mestih M4, M6 in M8, v spodnjem toku Trboveljščice in Bobna. Najvišja povprečna vrednost amonija je bila na Trboveljščici na vzorčnem mestu M6 in je znašala 1,13 mg/l.

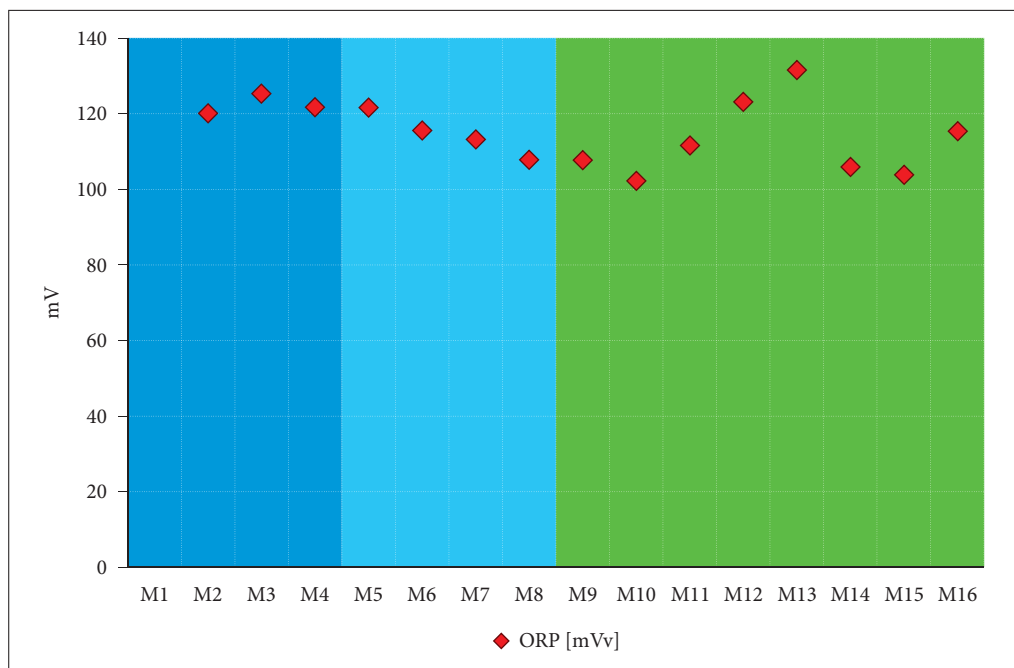
S sulfati sta bila obremenjena le Boben in Trboveljščica (slika 7). Podobno kot pri ostalih parametrih, smo to spojino v večjih količinah zaznali šele dolvodno od naselij Trbovlje in Hrastnik. V porečju Bobna smo vsebnost sulfata nad 25 mg/l, kolikor je spodnja meja občutljivost testa, izmerili le na vzorčnem mestu M4, v porečju Trboveljščice pa smo ga vsaj enkrat zaznali tudi na vzorčnih mestih gorvodno od Trbovelj. Vrednosti na Trboveljščici so bile na vzorčnem mestu M8, v primerjavi z vzorčnim mestom M6, nekoliko nižje zaradi dotoka s sulfatom manj obremenjene Bevščice. V porečju Medije smo sulfat zaznali le enkrat pred izlivom v Savo. Izmerjene vrednosti sulfata so se gibale od manj kot 25 mg/l (večina vzorčenj) do 150 mg/l na izlivu Trboveljščice v Savo (vzorčno mesto M8).

Povprečne vrednosti ORP so se gibale med 93 in 131 mV (slika 8). Najnižje povprečje je bilo na vzorčnem mestu M1 v zgornjem toku Brnice. Na Trboveljščici je vrednost po toku navzdol rahlo upadala, na Mediji pa je bila najvišja tik pred Zagorjem, nato pa se je ponovno znižala. Zaradi pozitivnih vrednosti so na vseh vzorčnih mestih ves čas merjenja vladali oksidacijski pogoji, kar pomeni, da je bilo v vodi raztopljenega dovolj kisika, da potekajo procesi razgradnje, ki potrebujejo kisik.

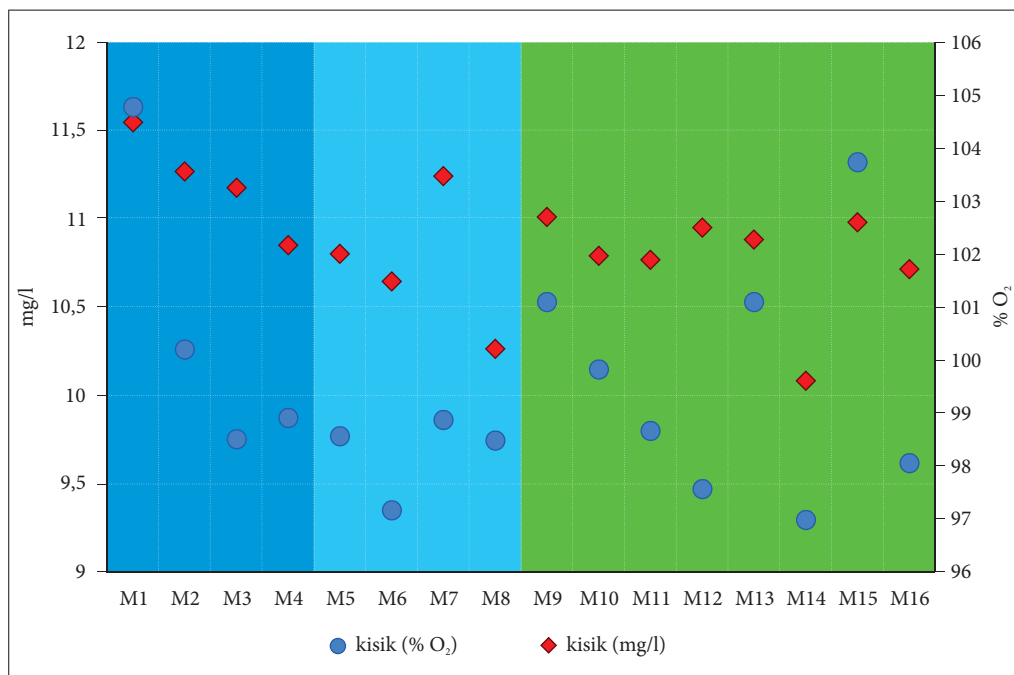
V splošnem sta bili povprečni vrednosti za količino v vodi raztopljenega kisika in nasičenost s kisikom na vseh vzorčnih mestih visoki in sta se gibali med 10,1 in 11,5 mg/l ter 97 in 104,7 % O₂ (slika 9). Razlike med posameznimi vzorčnimi mesti so majhne. Količina v vodi raztopljenega kisika v porečju Bobna in Trboveljščice je po toku navzdol upadala. Nasičenost s kisikom v porečju Bobna je po toku navzdol upadala, medtem ko se v porečju Trboveljščice ni bistveno spreminjala. V porečju Medije pa



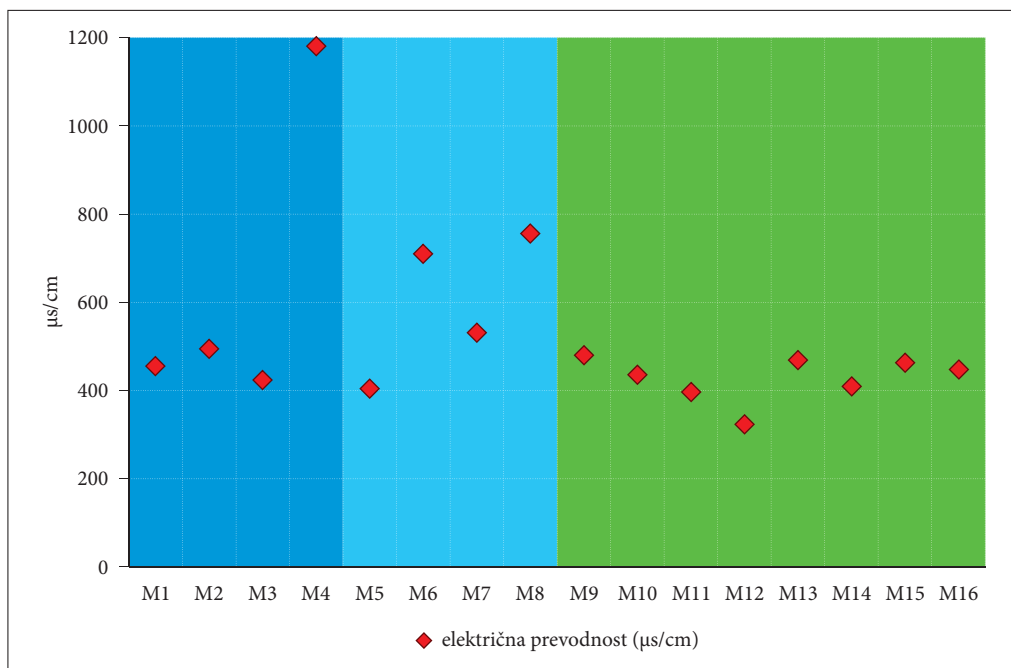
Slika 7: Povprečna vrednost sulfata na vzorčnih mestih (povprečje je izračunano le za vzorčna mesta, kjer smo zaznali sulfat).



Slika 8: Povprečna vrednost ORP na vzorčnih mestih.



Slika 9: Povprečna vrednost v vodi raztopljenega kisika in nasičenosti s kisikom na vzorčnih mestih.



Slika 10: Povprečna vrednost SEP na vzorčnih mestih.

je bila količina v vodi raztopljenega kisika na večini vzorčnih mest podobna, nasičenost s kisikom pa se je po toku navzdol nekoliko povečevala.

Povprečne vrednosti SEP so bile na vzorčnih mestih med 323 µS/cm in 1070 µS/cm (slika 10). Na preučevanih vodotokih se zaradi vse več v vodi raztopljenih elektrolitov vrednosti po toku navzdol v splošnem povečujejo. Do izrazitega povečanja na Bobnu in Trboveljščici ponovno pride dolvodno od naselij Trbovlje in Hrastnik, medtem ko na Mediji izrazito povečanje po prehodu večjih naselij ni bilo opazno. Na Bobnu je močno izstopalo vzorčno mesto M4 na izlivu v Savo, kjer smo poleg največje povprečne izmerili tudi največjo absolutno prevodnost (2264 µS/cm).

5 Razprava

Na vzorčnem mestu M1 (zgornji tok Brnice) so bile vrednosti za nitrate večinoma v skladu s pričakovanim naravnim ozadjem (0 do 5 mg/l). Izrazito visoko vrednost (50 mg/l) smo izmerili le enkrat v pomladanskem času, neposredno po prenehanju omejitve gnojenja kmetijskih zemljišč s 1. marcem (Uredba o varstvu ... 2009). Vrednost se je do vzorčnega mesta M2 (Spodnji tok Brnice) nekoliko znižala, a vseeno ostala zelo visoka (30 mg/l). V porečju Brnice smo večkrat izmerili tudi višje vrednosti nitritov, in sicer pri meritvah 7 (zima 2021) in 9 (pomlad 2021), ki so presegle priporočeno vrednost za nitrit v vodi (0,01 mg/l). Vrednosti fosfata in klorida so bile med letom večinoma na razmeroma nizki ravni. Mejna vrednost za fosfat (0,15 mg/l) je bila dosežena le enkrat. Tudi vrednosti kloridov ne nakazujejo na povečan antropogen vpliv. Na Brnici (vzorčni mesti M1 in M2) je bila vrednost sulfatov vedno pod spodnjo mejo merilnega območja testa (25 mg/l).

Pri vzorčnem mestu M3 (zgornji tok Bobna) so bile vrednosti nitrata, sulfata, klorida in amonija ves čas pod mejnimi vrednostmi, pri eni meritvi pa je bila presežena mejna vrednost za fosfat.

Na vzorčnem mestu M4 (Boben pred izlivom v Savo) je več parametrov ves čas presegalo mejne vrednosti. Opazna so tudi velika nihanja vrednosti različnih parametrov med letom, ki se ne skladajo s sezonsko dinamiko vsebnosti organskih hranil v zgornjem toku. Na vplivnem območju sta kemična in steklarska industrija. Struga potoka je od sotočja Bobna z Brnico do vzorčnega mesta M4 v celoti regulirana in na nekaterih mestih teče v zaprtem kanalu. Vrednosti klorida so bile razen pri treh meritvah v zimskih mesecih (6 (zima 2021), 7 (zima 2021) in 8 (pomlad 2021)) na zgornji meji merilnega območja testa (60 mg/l). Mejna vrednost za nitrata je bila presežena le pri osmem merjenju (pomlad 2021), ko je bila koncentracija nitratov povišana tudi na vzorčnih mestih M1 in M2. Zanimiva je tedanja dinamika sprememb koncentracije nitratov, saj se je ta na Brnici po toku navzdol zmanjševala (s 50 na 30 mg/l), pri izlivu Bobna v Savo pa smo ponovno izmerili precej višjo vrednost (70 mg/l). Večkrat so bile presežene tudi vrednosti nitrita, ki so pri treh vzorčenjih dosegle zgornjo mejo merilnega območja testa (0,5 mg/l). Pri drugi (pomlad 2020) in tretji meritvi (poletje 2020) smo izmerili povišane vrednosti amonija (3 mg/l), ki presegajo mejne vrednosti (1 mg/l) in so hkrati na zgornji meji merilnega območja testa. Ob vsakokratnem vzorčenju smo na tem mestu izmerili tudi visoke vrednosti fosfata, ki so bile hkrati na zgornji meji merilnega območja testa (0,25 mg/l). Zaznali smo tudi občasno onesnaženje s sulfati. Vrednosti so dosegle do 100 mg/l, kar je še vedno pod mejno vrednostjo za sulfat (150 mg/l), a hkrati nad priporočeno (15 mg/l). Sulfate smo v porečju Bobna izmerili le na vzorčnem mestu M4, zato je njihov najverjetnejši vir industrija. Indikator onesnaženosti so tudi izrazito visoke vrednosti SEP (povprečje meritev je 1180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, največja izmerjena vrednost pa 2264 $\mu\text{S}/\text{cm}$), kar kaže na izrazito povečano količino onesnaževal, ki raztopljene v vodi delujejo kot elektroliti. To je znatno nad vrednostmi za električno prevodnost tekočih voda zmerne pasu, ki običajno ne presegajo 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Boyd 2015).

Za vzorčna mesta M1, M2 in M3 v povirju Bobna je glavni vir onesnaževanja kmetijstvo, kar dokazuje letna dinamika prisotnih hranil, ki se spirajo s kmetijskih zemljišč. Naselja so, razen posameznih gospodinjstev zunaj strnjenih naselij, priključena na kanalizacijo, ki vodi do komunalne čistilne naprave Hrastnik, ki ima izpusť dolvodno od sotočja Bobna in Save in zato nima vpliva na vzorčna mesta. Za vzorčno mesto M4 na izlivu v Savo lahko zaradi neprestanih visokih vrednosti kloridov, fosfatov, SEP, večkrat povišanih vrednosti nitrata, nitrita, amonija in fosfata sklepamo, da je glavni vir onesnaževanja industrija. Pred tem vzročnim mestom se namreč tik ob vodi nahaja TKI, v katerem med drugim proizvajajo fosfate, izdelke iz klora in čistila (TKI... 2021). Večina odpadnih voda, ki jih proizvede TKI, se odvaja v komunalno čistilno napravo Hrastnik, del odpadnih voda, ki vsebujejo adsorbilne organske halogene, ogljikovodike v obliki mineralnih olj in prosti klor, pa se izliva v Boben. Kloridi, sulfati in amonijev dušik, ki nastanejo zaradi proizvodnega procesa v TKI Hrastnik, se po podatkih ARSO stekajo v kanalizacijo, ki se zaključuje s komunalno čistilno napravo. Vir sulfatov in klorida, ki smo jih zaznali na tem vzorčnem mestu, pa je, glede na podatke o odpadnih vodah iz industrije (ARSO 2021b), lahko tudi iztok odpadne vode iz Rudnika Trbovlje-Hrastnik.

Količina onesnaževal se na Trboveljščici po toku navzdol v splošnem povečuje. Na vzorčnem mestu M5 (zgornji tok Trboveljščice) so bile v vodi občasno povišane vrednosti nitrita. Priporočena vrednost (0,01 mg/l) je bila presežena ob vsaki meritvi, najbolj občutno pri tretji (poletje 2020) in peti (jesen 2020), kjer smo izmerili 0,2 mg/l. Višje vrednosti se pojavljajo poleti. Pri prvem (pomlad 2020) in drugem (pomlad 2020) merjenju smo zaznali tudi nekoliko povišano vrednost amonija. Kloridi in nitrati so večinoma v okviru vrednosti, ki ne nakazujejo na večji antropogen vpliv. Vrednost SEP je bila na tem vzorčnem mestu vsakič nižja kot na dolvodnih vzorčnih mestih M6 in M8, kar je verjetno deloma posledica prevlade nekarbonatne matične podlage v zaledju, deloma pa manjše celokupne prisotnosti onesnaževal v obliki elektrolitov. Sodeč po rabi zemljišč in povišanih vrednostih organskih gnojil, lahko predpostavimo, da je glavni vir onesnaževal kmetijstvo.

Na vzorčnem mestu M6 (Trboveljščica pod Trbovljami) se v primerjavi z vzorčnim mestom M5 vrednosti večine parametrov, ki nakazujejo na prisotnost onesnaževal, povešajo. V primerjavi z vzorčnim mestom M5 se povečajo vsebnost klorida, do 20 mg/l. Izmerili smo razmeroma visoke vrednosti nitrata, ki so bile le pri treh merjenjih pod mejno vrednostjo. Visoke so bile tudi vrednosti nitrita, ki

so pri dveh tretjinah meritev dosegle zgornjo mejo občutljivosti testa. V vodi smo večkrat izmerili povišane vrednosti fosfata. Vsakič smo izmerili tudi povišane vrednosti sulfata, največ pri prvem merjenju (150 mg/l). Glavni vir onesnaževanja so verjetno pomanjkljivo urejeni odtoki iz industrije, predvsem iztok industrijske vode, obremenjene s sulfati iz Rudnika Trbovlje-Hrastnik. Letna količina sulfata, ki ga vnesejo v vodotok izpusti iz rudnika v porečju Trboveljščice (5047 kg/leto), je po uradnih podatkih manjša kot v porečju Bobna (8079 kg/leto) (ARSO 2021b), česar pa naše meritve ne potrjujejo, saj smo na Trboveljščici izmerili višje vrednosti sulfata kot na Bobnu. Možen je tudi omejen vpliv gospodinjstev, saj kljub 97,7 % priključenih gospodinjstev na čistilno napravo, nekaj območij mesta še vedno nima urejene kanalizacije (ARSO 2021b; Žnidaršič s sodelavci 2021). Na vplivnem območju je tudi obrat proizvodnje kartonske embalaže in deponija DINOS s potencialno obremenjujočimi izcednimi vodami, ki pa se po podatkih ARSO (2021b) odvajajo na čistilno napravo Trbovlje.

Na vzorčnem mestu M7 so bile vrednosti klorida in amonija vedno pod mejnimi vrednostmi; vrednosti amonija so pri eni meritvi presegle priporočeno vrednost. Vrednosti nitrata so trikrat presegle mejno vrednost. Povišane vrednosti za nitrit, ko je ta dosegel 0,2 mg/l, smo izmerili pri eni meritvi. Ker smo povišano vsebnost nitrata izmerili samo pri eni meritvi, in to pozimi, gre najverjetneje za posledico spiranja s kmetijskih zemljišč. Povišane so bile tudi vrednosti fosfata, ki so petkrat dosegle ali presegle mejno vrednost (0,15 mg/l). Izmerili pa smo relativno nizke, a precej konstantne vrednosti sulfata okoli vrednosti 40 mg/l. Vrednosti SEP so zaradi karbonatnega zaledja nekoliko višje.

Na vzorčnem mestu M8 (Trboveljščica pred izlivom v Savo) smo izmerili najvišje povprečne vrednosti za vse merjene parametre v porečju Trboveljščice. Zaznali smo povišane vrednosti kloridov, ki so v pomladanskih mesecih (meritvi 1 (pomlad 2020) in 9 (pomlad 2021)) dosegli 40 mg/l. Pri petih meritvah so bile presežene mejne vrednosti za nitrat. Pogoste so bile tudi povišane vrednosti nitritov in fosfatov, ki so v obeh primerih vsaj pri šestih meritvah dosegle najvišjo vrednost merilnega območja testa (0,5 mg/l za nitrit in 0,25 mg/l za fosfat). Pri dveh meritvah so vrednosti amonija presegle mejno vrednost ter v enem primeru tudi najvišjo vrednost merilnega območja testa. Vrednosti sulfata so bile nekoliko nižje kot na gorvodnem vzorčnem mestu M6, kar je verjetno posledica dotoka s sulfatom manj obremenjene Bevčice.

Vrednosti klorida v porečju Medije nikjer niso presegle 12 mg/l, najnižje pa so bile praviloma na izviru ter v zgornjem toku. Podobno velja za vrednosti nitrata (z izjemo ene meritve na vzorčnem mestu M14 na Orehovici) in fosfata, ki so bile na vseh vzorčnih mestih pod mejno vrednostjo, najvišje povprečne vrednosti v porečju pa so bile na vzorčnem mestu M9. Na vzorčnih mestih M11 in M14 smo občasno izmerili povišane vrednosti nitrata. Na vzorčnem mestu M11 smo pri tretji meritvi (poletje 2020) izmerili 0,3 mg/l nitrata. Na vzorčnem mestu M14 pa je do povišanja prišlo v pozno poletnem in jesenskem času, ko smo namerili 0,5 mg/l nitrata, kar je hkrati tudi najvišja vrednost merilnega območja testa. Nitrit je tudi edini izmed parametrov, ki je v porečju Medije na več vzorčnih mestih presegel priporočeno vrednost. Pri četrti meritvi (poletje 2020) smo izmerili povišane vrednosti amonija na vzorčnih mestih M9, M11, M12, M13 in M14. Na drugih vzorčnih mestih amonija nismo zaznali. Na vzorčnem mestu M11 smo pri tej meritvi izmerili 3 mg/l amonija, kar presega mejno vrednost in je hkrati tudi najvišja vrednost merilnega območja testa. Pri deveti meritvi (pomlad 2021) smo pred sotočjem Medije s Savo (M9) izmerili rahlo povišane vrednosti sulfatov (25 mg/l), kar pa je bil tudi edini primer, ko smo v porečju Medije v vodi zaznali sulfate. Glede na rezultate meritev je očitno, da je gledano v splošnem v porečju Medije kakovost voda boljša kot v porečjih Bobna in Trboveljščice. Glavni viri onesnaževanja so glede na izmerjene vrednosti preučevanih parametrov verjetno izpusti iz gospodinjstev, ki niso priključena na javno kanalizacijsko omrežje, kmetijstvo ter v manjši meri industrija. Gospodinjstva v neposredni okolici naselja Zagorje ob Savi in v okolici Kisovca so v 97 % priključeni na komunalno čistilno napravo. Na Izlakah je 40 % gospodinjstev priključenih na javno kanalizacijo, ki pa vodo odvaja neposredno v vodotoke. Ostala naselja nimajo urejenega kanalizacijskega omrežja (Komunala ... 2019; 2021).

Rezultati meritev kažejo na pomemben antropogeni vpliv na kakovost vode predvsem v porečju Bobna in Trboveljščice, kjer so vrednosti nekaterih merjenih parametrov pogosto presegle tako

priporočene kot mejne vrednosti ali pa so bile celo na zgornji meji merilnega območja uporabljenih testov. Slednje dopušča možnost, da je onesnaženost Bobna in Trboveljščice dejansko še bistveno večja od ugotovljene. V zgornjem, redkeje poseljenem delu porečij obeh vodotokov, je glavni pritisk na vode kmetijska dejavnost, v spodnjem, gosteje poseljenem, pa predvsem odplake iz gospodinjstev, ki še niso priključena na čistilno napravo in industrije. Izvedene meritve potrjujejo, da se v skladu s stopnjevanjem pritiskov na vode po toku navzdol tudi kakovost Bobna in Trboveljščice progresivno poslabšuje. V porečju Medije smo z opravljenimi analizami fizikalno-kemijskih parametrov vpliv antropogenih pritiskov na vode zaznali v bistveno manjši meri. Vzrok je verjetno v manjšem številu industrijskih obratov z obremenjujočimi izpusti, manjši gostoti poselitve ter približno trikrat večji površini porečja in posledično večjemu pretoku Medije, ki vpliva na učinkovitejše redčenje onesnaževal. Kljub temu pa je tudi v porečju Medije mestoma opazno povečevanje vrednosti nekaterih parametrov na posameznih pritokih ter v spodnjem toku Medije, kjer so pritiski na vode bolj zgoščeni.

Na primeru Medije, Trboveljščice in Bobna se je pokazalo, da so lahko tudi manjši, povirni vodotoki, ki so izvzeti iz rednega monitoringa kakovosti voda, precej onesnaženi, še posebej kadar tečejo skozi večja naselja in industrijska območja ter so posledično izpostavljeni znatnim pritiskom. Slednje je velik izziv za upravljanje s takimi vodotoki ter hkrati odpira vprašanje o ustreznosti obstoječih normativov za določanje vodnih teles (Pravilnik ... 2005). Glavno vodilo pri določanju vodnih teles je velikost prispevnega območja, ki mora presegati 100 km², medtem ko vidik obstoječih pritiskov na vode (razen v delu, ki se nanaša na fizične in hidromorfološke spremembe na vodotoku) ni upoštevan. Problematiko izključenosti manjših, povirnih vodotokov iz rednega monitoringa kakovosti voda na ravni Evropske unije naslavlja tudi Baattrup-Pedersen s sodelavci (2018), ki ugotavlja, da bi bilo za celovito upravljanje s porečji med samostojna vodna telesa smotno uvrstiti tudi tiste manjše, povirne vodotoke, ki imajo potencialno pomemben negativen vpliv na kakovost vode večjih vodnih teles, kar velja tudi za vpliv Bobna, Trboveljščice in Medije na Savo. Sava je bila namreč do konca 20. stoletja, tudi zaradi omenjenih onesnaženih pritokov, po tedanji metodologiji ocenjevanja kakovosti voda uvrščena v najslabši četrti kakovostni razred, njeno stanje pa se je izboljšalo šele po sanaciji nekaterih industrijskih obratov ter zaprtju premogovnikov v Zasavju (Cvitanič s sodelavci 2017; Občina ... 2024). Če ne prej, bo vpliv njenih zasavskih pritokov na kakovost Save postal aktualen ob morebitni izgradnji verige hidroelektrarn na srednji Savi (predvsem elektrarn Trbovlje in Suhadol). Te bodo namreč spremenile odtočni režim Save, zmanjšale njene samočistilne sposobnosti in povečale njeno vodno-ekološko občutljivost, zaradi česar bo reka bolj dovzetna za vsakršno onesnaževanje.

6 Sklep

Med 15. marcem. 2020 in 17. aprilom 2021 smo izvajali meritve izbranih fizikalno-kemijskih parametrov kakovosti vode v porečjih Medije, Trboveljščice in Bobna. Opravili smo devet meritev na šestnajstih vzorčnih mestih in na ta način dobili vpogled v obremenjenost preučevanih vodotokov z izbranimi onesnaževali. Ugotovili smo, da je kakovost vode Bobna in Trboveljščice slaba, saj so bile tam pogosto presežene mejne in priporočene vrednosti merjenih parametrov. Stanje kakovosti voda v porečju Medije je boljše. Na splošno se zaradi stopnjevanja pritiskov prisotnost onesnaževal na vseh vodotokih po toku navzdol povečuje, kakovost vode pa poslabšuje. Slednje ponovno pride bolj do izraza pri Bobnu in Trboveljščici, kjer se vrednost nekaterih preučevanih parametrov med zgornjim tokom in izlivom v Savo poveča tudi za deset- in večkrat, medtem ko je pri Mediji trend slabšanja kakovosti vode po toku navzdol manj izrazit.

V zgornjem toku Bobna in Trboveljščice so se povišane vrednosti fizikalno-kemijskih parametrov, ki nakazujejo na vpliv gnojenja (nitrat, nitrit, amonij in fosfat), pogosto pojavile spomladi in poleti, v hladnejšem delu leta pa so bile vrednosti večinoma blizu pričakanega naravnega ozadja. Slednje kaže na prevladujoč vpliv kmetijstva na kakovost voda, ki je večinoma sezonsko pogojen. Glavni viri

onesnaževanja v spodnjem toku Bobna in Trboveljščice so najverjetneje industrija (zlasti TKI v Hrastniku, Steklarna Hrastnik, Rudnik Trbovlje-Hrastnik in nekateri drugi obrati) in gospodinjstva oziroma poselev (predvsem spiranje z urbanih zemljišč ter izpusti iz čistilne naprave Trbovlje). Zaznali smo tudi velika nihanja vrednosti nekaterih parametrov, kar lahko negativno vpliva na ekosisteme ter biotsko raznovrstnost. Pritiski na kakovost vode v porečju Medije so manjši. Občasno so se povišane vrednosti preučevanih parametrov pojavile predvsem na nekaterih pritokih, na Mediji pa le v spodnjem toku.

Izvedene meritve so zajele razmeroma majhno število fizikalno-kemijskih parametrov in so zato izrazito preliminarne značaja, zaradi česar dobljeni rezultati nikakor ne morejo nadomestiti izsledkov rednega državnega monitoringa ter kompleksnega ocenjevanja kemijskega in ekološkega stanja vodotokov. Vseeno pa nudijo vpogled v kakovost vode preučevanih vodotokov ter razkrivajo nekatere izzive na področju upravljanja z zasavskimi vodotoki. Nadalje lahko služijo kot podlaga za ciljno raziskovanje virov onesnaževanja ter snovanje predlogov ukrepov za izboljšanje kakovosti vode. Za izboljšanje stanja Medije, Trboveljščice in Bobna bi bilo treba bolje očistiti odpadne industrijske vode, uvesti nadzor nad morebitnimi nedovoljenimi izpusti, priključiti preostala gospodinjstva na kanalizacijo ter komunalne in druge vrste manjših čistilnih naprav, zmanjšati in bolj smotrno uporabljati gnojila na kmetijskih zemljiščih ter renaturirati in trajnostno urejati struge vodotokov za zagotovitev večjih samočistilnih sposobnosti. Smiselno bi bilo tudi, da bi preučevane vodotoke zaradi znatnih pritiskov v njihovih porečjih ter njihovega potencialnega vpliva na slabšo kakovost Save, določili za samostojna vodna telesa ali skupino vodnih teles in na njih uvedli redni monitoring spremljanja kakovosti vode.

Zahvala: Članek je nastal v okviru raziskovalnih programov Geografije Slovenije (P6-0101) in Trajnostni regionalni razvoj Slovenije (P6-0229) ter programa Mladi raziskovalec (MR-56874), ki jih financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.

7 Viri in literatura

Glej angleški del prispevka.