

Primljeno / Received
02-12-2021 / 2021-12-02Prihvaćeno / Accepted
25-02-2022 / 2022-02-25

Ivan Martinić

Pregled klasifikacija i suvremenih istraživanja izvora u svijetu i Hrvatskoj

An overview of classifications and modern research of springs in the world and in Croatia

Zbog svoje važnosti izvori su bili predmet znanstvenih proučavanja već od kraja 17. stoljeća. Razvojem znanosti kroz 19., a posebno kroz 20. i 21. stoljeće, izvori su postali predmetom proučavanja različitih znanstvenih polja i grana. Rezultat raznolikih proučavanja izvora bogate su spoznaje o njihovim različitim obilježjima te razvoj brojnih klasifikacija. Temeljne klasifikacije nastale su početkom dvadesetoga stoljeća, a u posljednjih dvadesetak godina javlja se potreba i želja znanstvenika za interdisciplinarnim istraživanjima i klasifikacijama izvora. Međutim, danas još ne postoji ni međunarodno prihvaćena interdisciplinarna klasifikacija ni baza podataka izvora koje bi olakšale usporedbu dosad istraženih obilježja izvora i korištenje istraživanjem dobivenih podataka. U Hrvatskoj se uglavnom istražuju i klasificiraju vodom bogati krški izvori, koji čine atraktivne pojave u prostoru, dok su nekrški izvori uglavnom manje istraživani. Cilj je ovoga rada predstaviti razvoj klasifikacija izvora kroz povijest, osvrnuti se na različitost pristupa istraživanjima koje su do njih dovele te predstaviti najznačajnija suvremena istraživanja izvora u svijetu i Hrvatskoj.

Because of their importance, water springs have been the subject of scholarly study since the late 17th century. With the development of science in the 19th, and especially in the 20th and 21st centuries, they became the object of study of various fields and branches of science. The result of the diverse studies of springs is a rich knowledge of their properties and the development of numerous classifications. Most basic classifications were created at the beginning of the 20th century, but a need for interdisciplinary research and classification of springs has emerged in the last twenty years. Today, however, there is no internationally-accepted interdisciplinary classification or database of springs that would facilitate the comparison of researched features and the use of research data. In Croatia, water-rich karst springs, which are attractive phenomena, have been thoroughly researched and classified, while non-karst springs have been examined less. The aim of this paper is to present the development of spring classifications throughout history, to emphasize the variety of research approaches that have been used, and to present the most important modern research of springs in the world and in Croatia.

Ključne riječi: izvori vode, klasifikacije izvora, tipovi izvora, vodni resursi

Key words: springs, spring classification, spring types, water resources

Uvod

Izvor je mjesto izlaska podzemne vode na Zemljinu površinu (Bryan, 1919; Dukić, 1984; Springer i dr., 2008; Glazier, 2014). Iako je definicija izvora relativno jednostavna, njihova raznolikost te složenost procesa zaslužnih za njihov nastanak čine ih zanimljivim objektom proučavanja.

Većina izvorske vode potječe od padalina koje prodiru u podzemlje, gdje se voda kraće ili dulje zadržava (od nekoliko sati do nekoliko desetaka tisuća godina). Pod utjecajem gravitacijske sile i/ili različitih tlakova podzemna voda izbija na površinu (Glazier, 2014). Voda izvire na površinu iz zasićenoga tla ili porozne stijene, iz pora, pukotina, špilja ili duž kontakta dviju stijena. Voda iz podzemlja može otjecati kapanjem, stvaranjem koncentriranoga toka (potoka ili rijeke), formiranjem jezera ili močvare te uzlaznim izbijanjem poput vodoskoka (Springer i Stevens, 2009; Glazier 2014). Pojavnost izvora, način istjecanja vode, ali i druga obilježja određeni su obilježjima vodonosnika iz kojega voda izlazi na površinu (Glazier, 2014).

Izvori imaju vrlo važnu ekološku ulogu. Čine važnu sastavnicu u funkcioniranju ekosustava, a pojedini izvori važna su žarišta bioraznolikosti. Zbog svoje relativno male veličine i izoliranosti vrlo su osjetljiva i ugrožena mikrostaništa (Cantonati i dr. 2020; 2021). Osim ekološke važnosti izvori su kroz povijest imali veliku važnost i za čovjeka. Prvenstveno su korišteni kao izvor pitke vode, a koristili su se (i još se uvijek koriste) i u zdravstvene svrhe (van Tubergen i van der Linden, 2002; Gianfaldoni i dr., 2017). Pojedini izvori imaju duhovnu i religijsku važnost (Risko, 2018; Bikse i Gavinolla, 2021), a u novije vrijeme izvori su dio turističke ponude, posebno termalni izvori (toplice) (Fifty i dr., 2020; Bikse i Gavinolla, 2021) te atraktivni krški izvori (npr. Antić i dr., 2019, France Voyage; Una Spring of Life).

Zbog svoje važnosti izvori su bili predmet znanstvenih proučavanja već od kraja 17. stoljeća (Perrault, 1674). Razvojem znanosti kroz 19., a posebno 20. i 21. stoljeće, izvori su postali predmetom proučavanja različitih znanstvenih polja i grana, kao što su (hidro)geologija, hidrologija, geomorfologija, geografija, (hidro)biologija (ekolo-

Introduction

A spring is the site where groundwater emerges onto the Earth's surface (Bryan, 1919; Dukić, 1984; Springer et al., 2008; Glazier, 2014). Although the definition of a spring is relatively simple, the diversity and complexity of the processes responsible for their formation make them a very interesting object of study.

The water of most springs ultimately originates from precipitation seeping underground, where it remains for an indeterminate period of time (hours to millennia). Under the influence of gravity and/or various pressures, groundwater emerges onto the surface (Glazier, 2014). Water emerges from saturated soil or porous rock, pores, cracks, caves, or along the contact areas between rocks. Groundwater may run off little by little, form a concentrated flow (stream or river), form a lake or swamp, or rise in the form of a fountain (Springer and Stevens, 2009; Glazier 2014). The appearance of a given spring is determined by the characteristics of its aquifer (Glazier, 2014).

Springs play a very important ecological role. They are an important part of the ecosystem, and certain springs are important centers of biodiversity. Due to their relatively small size and isolation, springs are very sensitive and endangered microhabitats (Cantonati et al. 2020; 2021). In addition to their ecological importance, springs have also been of great importance to humans throughout history. They have served primarily as a source of drinking water, but were (and still are) also used for health purposes (van Tubergen and van der Linden, 2002; Gianfaldoni et al., 2017). Some springs have spiritual and religious significance (Risko, 2018; Bikse and Gavinolla, 2021), and more recently springs have become part of the tourist supply, especially thermal springs (spas) (Fifty et al., 2020; Bikse and Gavinolla, 2021) and scenic karst springs (Antić et al., 2019, France Voyage; Una Spring of Life).

Because of their importance, springs have been the subject of scientific study since the late 17th century (Perrault, 1674). With the development of science in the 19th, and especially in the 20th and 21st centuries, springs became the object of study of various scientific fields and branches such as (hydro)geology, hydrology, geomorphology, geography, (hydro)biology (ecology),

gija), (hidro)kemija i dr. Razlog je tomu posebnost izvora kao pojave jer su izvori dodirna točka i poveznica hidrosfere, litosfere, biosfere i atmosfere. Rezultat raznolikih proučavanja izvora bogate su spoznaje o njihovim različitim obilježjima te razvoj brojnih klasifikacija izvora. Izvori se i danas aktivno proučavaju te se razvijaju nove klasifikacije. Cilj je ovoga rada predstaviti razvoj značajnijih klasifikacija izvora kroz povijest, osvrnuti se na različitost pristupa istraživanjima koje su do njih dovele te predstaviti najvažnija suvremena istraživanja izvora u svijetu i Hrvatskoj. Ranije preglede istraživanja i klasifikacija izvora proveli su Alfaro i Wallace (1994), Wallace Pitts i Alfaro (2001), Krešić (2010), Glazier (2014) te Stevens i dr. (2021). Ovaj rad povezuje i dopunjuje pregled klasifikacija izvora predstavljenih u navedenim radovima, čemu je dodan i pregled suvremenih istraživanja izvora u svijetu. Također, ovo je prvi rad koji obuhvaća pregled istraživanja izvora u Hrvatskoj.

Prva znanstvena istraživanja izvora

Prije 17. stoljeća nije bilo sustavna zapisivanja i praćenja podataka o izvorima, već su oni samo sporadično zapisivani. Podaci o njihovu geografskom smještaju, veličini, kakvoći i temperaturi vode prenosili su se većinom usmenim putem. Da su se podzemne vode i izvori proučavali i iskorištavali, dokazuju ostaci starih vodoopskrbnih sustava iz antike te srednjega i novoga vijeka (Alfaro i Wallace, 1994).

Najstarije zabilježeno znanstveno djelo koje se bavi izvorima potječe iz 1674. godine (Perrault, 1674). Perrault je prvi počeo promatrati izvore i kretanje podzemnih voda. U svojoj knjizi *O porijeklu izvora (De L'origines des fontaines)* iznosi rezultate svojih istraživanja na temelju kojih je utvrdio da je kiša katalizator podzemnih tokova (Perrault, 1674; Alfaro i Wallace, 1994).

U 19. stoljeću Arago (1835) se u svojem djelu referira na Perraulta te piše o pojedinim vrstama izvora kao što su gejziri i termalni izvori, a spominje i zapažanja vezana uz njihova kemijska obilježja. Također spominje i fenomen pod-

(hydro)chemistry, etc. The reason for this is the peculiarity of the phenomenon of springs, as they represent a point of contact and connection between the hydrosphere, lithosphere, biosphere, and atmosphere. The result of studying springs from various aspects is a rich knowledge of their various characteristics and the development of numerous classifications of springs. Nevertheless, springs are still being actively studied and new classifications are being developed. The aim of this paper is to present the development of the main classifications of springs throughout history, the various research approaches that have been used, and the most important modern research on springs in the world and in Croatia. Reviews of research and classification of springs have also been written by Alfaro and Wallace (1994), Wallace Pitts and Alfaro (2001), Krešić (2010), Glazier (2014) and Stevens et al. (2021). This paper connects and complements those papers and adds an overview of modern research of springs in the world. In addition, this is the first paper to provide an overview of spring research in Croatia.

The first scientific research of springs

Before the 17th century, there was no systematic recording and monitoring of information regarding springs, rather only sporadic documentation. The information about geographical location, size, potability, and water temperature was mostly passed on orally. Groundwater and springs were indeed studied and exploited, as is shown by the remains of historical water supply systems from the ancient, medieval, and modern periods (Alfaro and Wallace, 1994).

The oldest scientific work dealing with springs dates from 1674 (Perrault, 1674). Perrault was the first to document observations of springs and the movement of groundwater. In his book *On the Origin of Springs (De L'origines des fontaines)*, he presents the results of his research, based on which he determined that rain is a catalyst for underground flow (Perrault, 1674; Alfaro and Wallace, 1994).

In the 19th century, Arago (1835) referred to Perrault in his work and wrote about certain types of springs, such as geysers and thermal springs, and made observations related to their chemical characteristics. He also mentioned the phenomenon of

morskih izvora slatke vode (vrulje) i propitkuje njihovo porijeklo. Paramelle (1856) se u svojem djelu bavi umijećem otkrivanja izvora te u njemu ističe Perraulta kao zaslužnog za razvijanje metoda mjerenja izdašnosti izvora. Upućuje na važnost takvih mjerenja zbog utjecaja izvora na vodostaje tekućica (Paramelle, 1856; Alfaro i Wallace, 1994).

Istraživanja u prvoj polovini 20. stoljeća i prve klasifikacije izvora

Početak 20. stoljeća donio je prve opsežnije znanstvene radove o obilježjima izvora. Mnogi od radova iz toga razdoblja donose temeljne spoznaje i prve klasifikacije izvora. Keilhack (1912, prema Bryan 1919; Alfaro i Wallace, 1994) prvi pokušava uvesti sveobuhvatnu klasifikaciju izvora. Njegove klase izvora nisu se međusobno isključivale, a dijelio ih je prvenstveno na uzlazne i silazne, odnosno prema dominantnoj sili koja utječe na istjecanje vode na površinu.

Najveći doprinos klasificiranju izvora i općenitom znanju o njima dali su Bryan (1919) i Meinzer (1923). Većina kasnijih klasifikacija temelji se upravo na tipovima izvora ovih dvaju znanstvenika. Bryan (1919) donosi nekoliko vrsta klasifikacija izvora prema njihovim osnovnim obilježjima. Podijelio je izvore prema porijeklu vode u dvije osnovne skupine – izvore vode dubinskoga porijekla i izvore vode iz plitkih vodonosnika (meteorske vode).

Izvore dubinskoga porijekla podijelio je na vulkanske i pukotinske, unutar kojih posebno izdvaja rasjedne izvore. Izvore plitkih vodonosnika dijeli prema strukturno-litološkim obilježjima u četiri klase: a) izvori u poroznim stijenama (depresijski), b) izvori u poroznim stijenama koji natkrivaju nepropusne stijene (kontaktni), c) izvori u poroznim stijenama uklještenim između nepropusnih stijena (arteški) i d) izvori u nepropusnim stijenama. Svaka od navedenih kategorija dijeli se još na dodatne potkategorije izvora, ovisno o njihovim specifičnim obilježjima. Bryan također dijeli izvore i prema temperaturi vode na termalne i netermalne; prema

undersea freshwater springs (*vruljas*) and explored their origin. Paramelle (1856) dealt with ways of discovering springs in his work and pointed out that Perrault was responsible for developing methods of measuring the discharge of springs. He pointed out the importance of such measurements due to the influence of springs on the water levels of rivers (Paramelle, 1856; Alfaro and Wallace 1994).

Research in the first half of the 20th century and the earliest classification of springs

The beginning of the 20th century saw the first extensive scientific papers on the characteristics of springs. Many of the papers from this period provided basic insights and the earliest classifications of springs. Keilhack (1912, after Bryan 1919; Alfaro and Wallace 1994) was the first to attempt to introduce a comprehensive classification of springs. His spring classes were not mutually exclusive, and he divided them primarily into ascending and descending, i.e. according to the predominant force affecting the outflow of water to the surface.

The most important contributions to the classification of springs were made by Bryan (1919) and Meinzer (1923). Most of the later classifications are based on the spring types determined by these two scientists. Bryan (1919) listed several types of classifications of springs according to basic characteristics. He divided springs into two basic groups according to the origin of their water: springs with deep-seated waters and springs with waters from shallow aquifers (meteoric water).

He divided the deep-seated waters into volcanic and fissure, within which he identified fault springs. Springs of shallow aquifers were divided into four classes according to structural-lithological features: a) springs in porous rocks, (depression springs), b) springs in porous rock overlying impervious rocks (contact springs), c) springs in porous rock between impervious rocks (artesian springs), and d) springs in impervious rocks. Each of these categories was further subdivided into additional subcategories of springs, depending on specific characteristics. In addition, Bryan divided springs by water temperature into thermal and non-thermal springs, by salinity on

slanoći na slane i neslane, prema količini mineralnih stvari na mineralne i obične; prema stalnosti na stalne, povremene i periodične. Stalni izvori teku kroz cijelu godinu, povremeni se javljaju samo tijekom i neposredno nakon padalina, a periodični teku maksimalnom snagom u određenom razdoblju (bez izravne ovisnosti o količini padalina). Bryan u svom radu spominje i opisuje zasebne vrste izvora kao što su gejziri, jezerasti izvori, kipteći izvori, itd.

Meinzer (1923) dijeli izvore u različite klase prema 11 kriterija: (1) obilježjima otvora kroz koji izlazi voda; (2) glavnoj sili koja vodu dovodi do površine; (3) litološkim obilježjima vodonosnika; (4) geološkom horizontu vodonosnika; (5) okruženju (okolici) u koju se voda ispušta; (6) količini ispuštene vode (izdašnosti/protoku); (7) ujednačenosti tečenja; (8) trajnosti tečenja; (9) kakvoći vode; (10) temperaturi vode; i (11) ostalim obilježjima izvora.

Prema obilježjima otvora kroz koje izlazi voda (1) Meinzer dijeli izvore na tri vrste: procijedni izvori, u kojih voda istječe kroz više sitnih pukotina; pukotinski izvori, u kojih voda istječe kroz veće, izraženije pukotine; te cjevasti izvori, u kojih voda istječe kroz izraženi kružni otvor. S obzirom na glavnu silu koja dovodi vodu na površinu (2) Meinzer dijeli izvore na gravitacijske i negravitacijske, slično Bryanu (1919). Za podjelu izvora prema litološkim obilježjima vodonosnika (3), geološkom horizontu vodonosnika (4), okruženju u koje voda izlazi (5) i kakvoći vode (9) nisu određene precizne klase.

Vjerojatno najvažnija i najkorištenija podjela izvora koju je uspostavio Meinzer jest ona prema količini ispuštene vode (izdašnosti) (6). Izvori su podijeljeni u 8 klasa, odnosno razreda vrijednosti količine vode koju izvor ispušta u jedinici vremena (tab. 1).

Bitno je istaknuti i Meinzerove podjele izvora prema ujednačenosti (varijabilnosti) tečenja (7) i stalnosti tečenja (8). Ujednačenost, odnosno varijabilnost definirao je kao omjer fluktuacije izdašnosti i prosječne izdašnosti. Izrazio ju je kroz formulu: $V=100 [(a-b)/c]$, gdje je V varijabilnost izražena u postotku, a je maksimalna iz-

saline and non-saline springs, by mineral content into mineral and common springs, and by permanence of discharge into perennial, intermittent, and periodic springs. Perennial springs flow throughout the year, intermittent springs occur only during and immediately after rainfall, and periodic springs have peak discharge during a specific period (with no direct dependence on precipitation). In his work, Bryan also mentioned special types of springs such as geysers, lake springs, boiling springs, etc.

Meinzer (1923) classified springs into different types according to 11 aspects: (1) character of the openings through which water emerges, (2) rock structure and the resulting force that brings the water to the surface, (3) lithologic characteristics of the aquifer, (4) geological horizon of the aquifer, (5) the *sphere* into which the water is discharged, (6) quantity of water discharged, (7) uniformity of the rate of discharge, (8) permanence of the discharge, (9) quality of the water, (10) temperature of the water, and (11) other characteristics of the spring.

According to the characteristics of the openings through which the water emerges (1), Meinzer divided springs into three types: seepage springs, in which the water flows through several small fissures; fracture springs, in which the water flows through larger, more pronounced fissures (fractures); and tubular springs, in which the water flows through a pronounced round opening. For the main force that brings water to the surface (2), Meinzer divided springs into gravitational and non-gravitational (artesian) springs, similar to Bryan (1919). No precise classes were established for the classification of springs according to the lithologic characteristics of the aquifer (3), geological horizon of the aquifer (4), the *sphere* into which the water is discharged (5), or water quality (9).

Probably the most important and most frequently used classification of springs, according to Meinzer, regards the quantity of water discharged (6). Springs were divided into 8 classes according to the amount of water a spring discharges (Tab. 1).

It is important to highlight Meinzer's classification of springs in relation to the uniformity (variability) of discharge (7) and the permanence of discharge (8). He defined this uniformity, i.e. variability, as the relationship between the amplitude of the discharge and

Tab. 1. Podjela izvora prema izdašnosti
Tab. 1 Springs by quantity of water discharged

Kategorija izvora / Spring Category	Izdašnost (L/s) / Discharge (L/s)
I	> 10 000
II	1000 – 10 000
III	100 – 1000
IV	10 – 100
V	1 – 10
VI	0,1 – 1
VII	0,01 – 0,1
VIII	< 0,01

Izvor: prema Meinzer, (1923)
Source: after Meinzer, (1923)

dašnost, b je minimalna izdašnost i c je prosječna izdašnost. S obzirom na varijabilnost izvori se dijele na konstantne, čija varijabilnost prema navedenoj formuli ne prelazi 25 %; subvarijabilne, čija varijabilnost iznosi između 25 i 100 %; te varijabilne, s varijabilnošću većom od 100 %. Prema stalnosti tečenja (8) Meinzer je izvore, slično Bryanu (1919), podijelio na stalne, koji teku kontinuirano, i povremene, koji teku samo u određenim razdobljima. Svi povremeni izvori trebali bi biti varijabilni, dok stalni mogu imati obilježja svih triju navedenih kategorija varijabilnosti. Među povremenim izvorima Meinzer izdvaja gejzire i periodične izvore kao posebne podvrste.

Prema temperaturi (10) Meinzer također dijeli izvore na termalne i netermalne, ali izdvaja podvrste termalnih – tople i vruće izvore, čija je granična temperaturna vrijednost temperatura ljudskoga tijela, odnosno 37 °C. Za netermalne izvora ističe da se izraz *bladni izvori* općenito upotrebljava za tu klasu izvora, ali istovremeno može značiti i vrstu izvora čija je temperatura vode znatno niža od prosječne temperature zraka područja u kojem izvire.

Bryan i Meinzer detaljno su razradili klasifikacije izvora prema njihovim osnovnim obilježjima, stoga ne čudi da se njihove podjele koriste i danas i čine temelj za većinu novih klasifikacija izvora. Međutim, u grupu temeljnih klasifikacija

the average discharge. He expressed this with the following formula: $V=100 [(a-b)/c]$, where V is the variability expressed as a percentage, a is the maximum discharge, b is the minimum discharge, and c is the average discharge. In terms of variability, springs are divided into constant, whose variability does not exceed 25% according to the above formula; subvariable, whose variability is between 25 and 100%; and variable, whose variability is above 100%. According to the constancy of discharge (8), Meinzer categorized similarly to Bryan (1919), dividing springs into perennial, which flow continuously, and intermittent, which flow only at certain times. All intermittent springs should be variable, while perennial springs may have the characteristics of all three categories of variability. Within occasional springs, Meinzer highlighted geysers and periodic springs as special subtypes.

According to temperature (10) Meinzer also divided springs into thermal and non-thermal, but distinguished sub-types of thermal—warm and hot springs—which have a temperature boundary that is the temperature of the human body, i.e. 37°C. For non-thermal springs, he pointed out that the term cold springs is generally used for this class of springs, but it can also refer to a type of spring that has a water temperature that is significantly lower than the average air temperature of the area where it originates.

Bryan and Meinzer elaborated spring classifications in detail according to their basic characteristics, so it is not surprising that their classifications are still

izvora Meinzerovim i Bryanovim klasifikacijama trebamo dodati i one Clarkea (1924), Stinyja (1933) te Steinmanna (1915) i Thienemanna (1924). Clarke (1924) se bavi temom kemijskoga sastava izvorske vode, odnosno klasifikacijom izvora s pomoću analize kemijskoga sastava otopljenih iona. Mineralne izvore podijelio je na kloridne, sulfatne, karbonatne, kisele i ostale, s različitim sastavima. Još je važnije što je Clarke ponudio najbitnije kriterije prilikom klasifikacije izvora općenito, a to su redom po važnosti: geološka obilježja, potom fizikalna obilježja vode i kemijska obilježja vode, što se podudara s načelima Bryanovih i Meinzerovih klasifikacija. Austrijski geolog Stiny (1933) podijelio je izvore u četiri kategorije, također s obzirom na (hidro)geološka obilježja izvora: izvori sa slobodnim otjecanjem (I), preljerni izvori (II), arteški izvori (III) i ostali izvori (IV). Posljednja kategorija izvora (IV) služila je za tipove izvora koji se ne mogu svrstati u prve tri kategorije, a to su primjerice gejziri, krški izvori, mineralni izvori i termalni izvori (Stiny, 1933 prema Alfaro i Wallace, 1994).

Nešto drukčiju podjelu izvora uspostavio je Bornhauser (1913), a dopunili su je Steinmann (1915) i Thienemann (1924). Podijelili su izvore prema vrsti, odnosno obliku staništa koje tvori izvor. Definirali su tri osnovne vrste, a to su reokreni izvori – kod kojih voda odmah na izlasku iz podzemlja stvara korito i nastavlja teći u obliku tekućice, zatim limnokreni – kod kojih voda izlaskom na površinu stvara veće ili manje ujezerenje te helokreni – kod kojih voda stvara veće ili manje močvarno stanište. Drukčija podjela i način promatranja izvora tih dvaju znanstvenika proizlazi iz njihove struke. Naime, Steinmann i Thienemann bili su biolozi, za razliku od Bryana i Meinzera koji su bili (hidro)geolozi. Zbog različitih interesa struke imali su i različite pristupe proučavanju izvora, a time i klasifikacije. Unatoč razlikama u pristupu i objektu proučavanja njihove klasifikacije nisu nepovezane, naprotiv, neki su znanstvenici kasnije kombinirali upravo te klasifikacije (npr. Zollhöfer i dr., 2000; Springer i Stevens, 2009).

used today and form the basis for most new spring classifications. In the group of basic classifications of springs, however, the classifications of Clarke (1924), Stiny (1933) and Steinmann (1915), and Thienemann (1924) should be added to those of Meinzer and Bryan. Clarke (1924) dealt with the subject of the chemical composition of spring water, i.e. the classification of springs on the basis of the analysis of the chemical composition of dissolved ions. He divided mineral springs into: chloride, sulfate, carbonate, nitrate, siliceous, acid, and others with different compositions. More importantly, Clarke proposed the main criteria for the general classification of springs, in order of importance: geological characteristics, physical properties of the water, and chemical properties of the water, which is consistent with the principles of classification of Bryan and Meinzer. The Austrian geologist Stiny (1933) divided springs into four categories, also with regard to their (hydro)geological characteristics: free-flowing springs (I); overflowing springs (II); artesian springs (III); and other springs (IV). The last category (IV) describes types of springs that cannot be classified into the first three categories, namely: geysers, karst springs, mineral springs, and thermal springs (Stiny, 1933, according to Alfaro and Wallace 1994).

A somewhat different classification of springs was established by Bornhauser (1913), and later complemented by Steinmann (1915) and Thienemann (1924). They classified springs according to the type or form of habitat formed by the spring. They defined the three basic types: rheocene springs, where the water forms a channel immediately after it emerges on the surface and continues in the form of a stream; limnocene springs, where the water forms a lake; and helocene springs, where the water forms a wetland habitat. The difference in the way these two scientists classified and observed springs was due to their professions. Namely, Steinmann and Thienemann were biologists, as opposed to Bryan and Meinzer, who were (hydro)geologists. Because of their professional interests, they also had different approaches to the study of springs and thus to classification. Despite different approaches and objects of study, their classifications were not unrelated; on the contrary, some scientists later used them in combination (e.g. Zollhoefer et al., 2000; Springer and Stevens, 2009).

Istraživanja i klasifikacije izvora u drugoj polovini 20. stoljeća

U drugoj polovini 20. stoljeća autori se uglavnom bave regionalnim istraživanjima, primjenjujući ili razvijajući osnovne klasifikacije s početka stoljeća. Također, javljaju se prve naznake interdisciplinarnosti, odnosno povezivanja podataka o izvorima iz različitih struka. Osim toga važno je istaknuti i razvoj digitalnih baza podataka i korištenje računala i automatskih klasifikacija.

Jedan od tipičnih primjera razvoja klasifikacija početka 20. stoljeća jest Netopilov iz 1971. On se koristi Meinzerovom klasifikacijom izvora po varijabilnosti (ujednačenosti) izdašnosti kao bazom za razvoj vlastitih klasa. Služi se statističkim metodama u kojima uzima vrijednosti izdašnosti prisutnih 10 % i 90 % vremena umjesto ekstremnih vrijednosti kojima se služi Meinzer. Na temelju njihova odnosa razvio je 5 klasa (tab. 2).

Iste godine Shuster i White (1971) analizirali su kemijska obilježja vode vapnenačkih izvora. Prema hidrogeološkim obilježjima podijelili su ih u dvije skupine – izvore difuznoga otjecanja i izvore koncentriranoga (cjevastoga) otjecanja, po uzoru na Bryana (1919). Usporedili su promjene u kemijskim obilježjima vode s tipovima izvora i pokazali kako izvori koncentriranoga otjecanja imaju veliku varijabilnost tvrdoće vode kroz godinu, dok je ona kod difuznih izvora konstantnija. Zaključili su kako je varijabilnost tvrdoće vode puno bolji pokazatelj tipa vodonosnika nego vrijednosti tvrdoće same po sebi. Ovo je jedan

Research and classification of springs in the second half of the 20th century

In the second half of the 20th century, the authors were mainly concerned with regional research, and applying or developing basic classifications from the beginning of the century. Furthermore, the first steps were taken towards interdisciplinary research, i.e. combining data from different disciplines. It is also important to highlight the development of digital databases and the use of computers and automatic classifications.

A typical example of 20th century classification development is that of Netopil (1971), who used Meinzer's classification of springs by discharge variability as the basis for developing his own classes. He used statistical methods whereby, instead of taking the extreme values used by Meinzer, he took the discharge values present 10% of the time and 90% of the time. Based on their relationship, he developed 5 classes (Tab. 2).

In the same year, Shuster and White (1971) analyzed the chemical properties of water from limestone springs. According to hydrogeological features, they were divided into two groups: springs with diffuse discharge and springs with concentrated (tubular) discharge, according to the model of Bryan (1919). They compared the changes in the chemical properties of water with the types of springs and showed that springs with concentrated discharge have a large variability in water hardness throughout the year, while this is more constant in diffuse springs. They concluded that water variability is a much better indicator of aquifer type than hardness values, per se. This is one of the first ex-

Tab. 2. Netopilova klasifikacija izvora prema varijabilnosti
Tab. 2 Netopil's classification of springs by variability

Q_{10}/Q_{90}^* / Spring Category	Klasa izvora / Source class
1,0 – 2,5	Izvanredno ujednačeni / Extraordinarily balanced
2,5 – 5,0	Dobro ujednačeni / Well-balanced
5,0 – 7,5	Ujednačeni / Balanced
7,5 – 10,0	Neujednačeni / Unbalanced
> 10,0	Izvanredno neujednačeni / Extraordinarily unbalanced

Izvor: Netopil, 1971 prema Alfaro i Wallace (1994)

Source: Netopil, 1971 after Alfaro and Wallace (1994)

* Q_{10} – izdašnost koja je prisutna 10 % vremena, Q_{90} – izdašnost koja je prisutna 90 % vremena

* Q_{10} – discharge present 10 % of the time, Q_{90} – discharge present 90 % of the time

od prvih primjera povezivanja različitih obilježja, odnosno klasa izvora i jedan od prvih koraka prema interdisciplinarnoj klasifikaciji izvora. Slično njihovu istraživanju, Freeze i Cherry (1979) analiziraju izvore prema kemijskom sastavu, povezujući rezultate s litologijom vodonosnika. Također, procjenjuju vrijeme zadržavanja vode u podzemlju kod analiziranih izvora na temelju kemijskih obilježja.

Fetter (1980) spominje Bryanove i Meinzerove klasifikacije prema stalnosti tečenja te posebnu pažnju pridaje podjeli izvora prema geološkim obilježjima. Na temelju njihovih načela razradio je i definirao 6 tipova izvora prema geološkim obilježjima: a) depresijske izvore, b) kontaktne izvore, c) rasjedne izvore, d) ponikvaste izvore, e) preljevne izvore i f) izvore pukotinskih zona (sl. 1).

Dunne (1980) te nastavno na njegovo istraživanje Dietrich and Dunne (1993) opisuju i analiziraju morfološke početke korita (engl. *channel head*). Treba napomenuti da je međusobnu povezanost položaja izvora s mehanizmima podzemnih tokova prvi primijetio i opisao Solger (1931). Ustanovljeno je kako je u vlažnijim krajevima početak korita vrlo često zapravo mjesto na kojem se nalazi stalni ili povremeni izvor, odnosno izvorišni obluk. Izvori dakle utječu na formiranje početaka korita, ali je točno mjesto izviranja vode često pod utjecajem padinskih procesa, kao što su kličenje i spiranje tla oko izvorišnog obluka. Dakle položaj izvora i početak korita međusobno utječu i ovisi jedan o drugome, te se zbog stalnih procesa denudacije i akumulacije njihova morfologija i položaj mijenja. Sukladno tome, Dietrich i Dunne nisu razvili fiksnu klasifikaciju izvora, već su odredili 10 tipova početaka korita prema njegovoj razvojnoj fazi i dominantnim procesima njihovog oblikovanja (sl. 2).

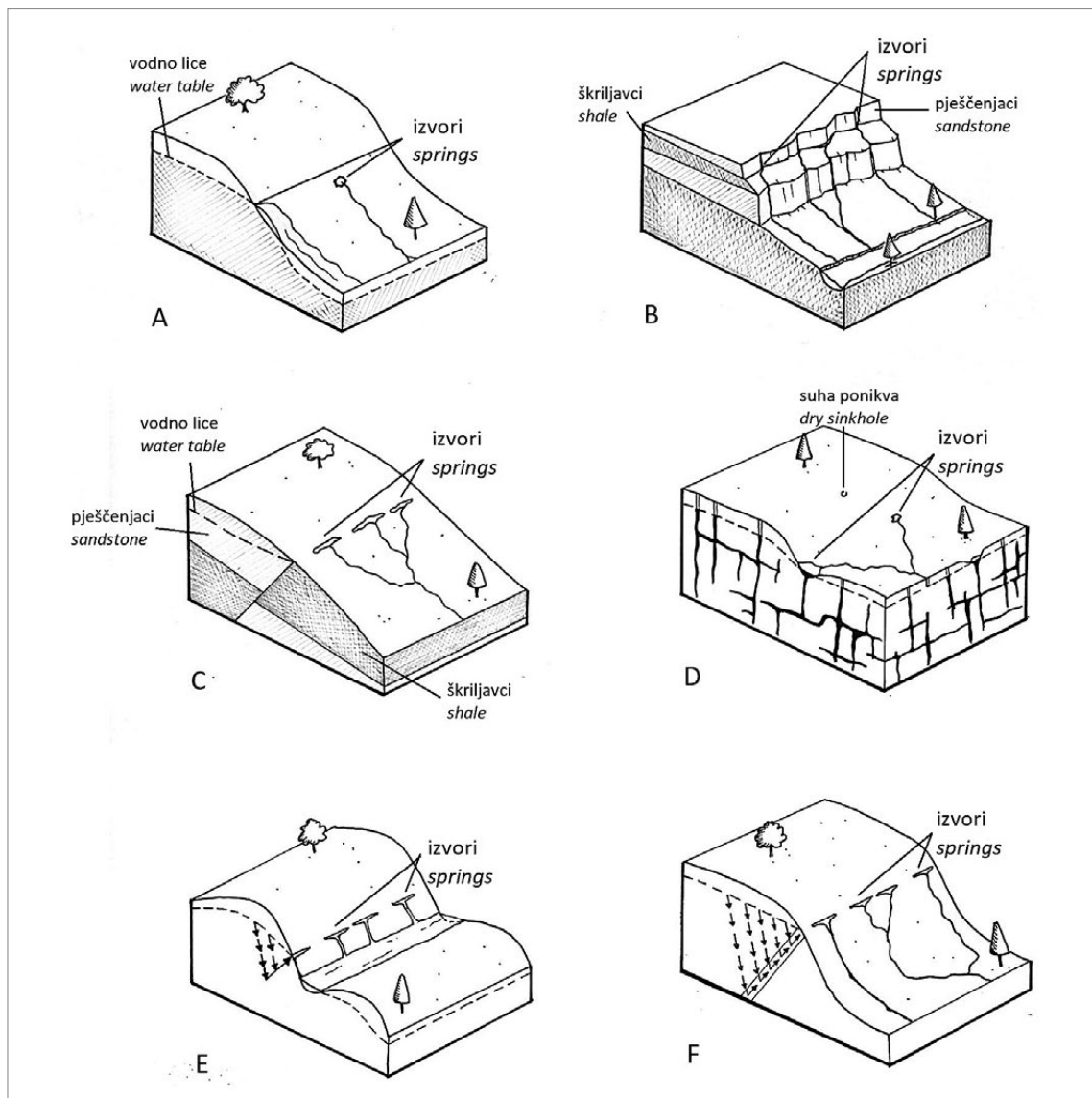
Gerecke i Di Sabatino (1996) nadopunjuju i mijenjaju Steinmannovu i Thienemannovu klasifikaciju na primjerima izvora Sicilije. Definiraju tipove prema vrsti staništa koju izvor tvori, odnosno načinu otjecanja nakon dolaska vode na površinu. Limnokreni izvori tvore lokvu ili jezero nakon koje teče potok, a bogati su vodenom vegetacijom. Helokreni su izvori koji tvore močvarno stanište, koje nastaje difuznim istjecanjem i otjecanjem

amples of research that linked different characteristics of springs, i.e. spring classes, and one of the first steps towards interdisciplinary spring classification. Similar to this research, Freeze and Cherry (1979) analyzed springs by chemical composition and linked the results to aquifer lithology. They also estimated the residence time of groundwater in the analyzed springs based on chemical properties.

Fetter (1980) mentioned Bryan's and Meinzer's classifications according to discharge constancy and paid special attention to the classification of springs according to geological characteristics. Based on their principles, Fetter (1980) developed and defined 6 types of springs according to geological characteristics: a) depression springs, b) contact springs, c) fault springs, d) sinkhole springs, e) joint springs, and f) fracture springs (Fig. 1).

Dunne (1980, Dietrich and Dunne, 1993) described and analyzed morphological channel heads. It should be noted that the relationship between the location of the spring and the mechanisms of underground flows was first noted and described by Solger (1931). It was found that in wetter areas, the beginning of the riverbed was very often the site of a perennial or intermittent spring or spring head. Thus, springs influence the formation of the beginnings of the channel, but the exact location of water origin is often influenced by hillslope processes around the spring head. Thus, the location of the spring and the beginning of the channel interact and are dependent on each other; and because of the constant processes of denudation and accumulation, their morphology and location change. Accordingly, Dietrich and Dunne did not develop a fixed classification of springs but determined 10 types of bed origins according to stage of development and dominant processes of formation (Fig. 2).

Gerecke and Di Sabatino (1996) supplemented and modified the classifications of Steinmann and Thienemann for the example of Sicilian springs. They defined types according to the type of habitat formed by the spring, i.e. the type of flow after water emerges to the surface. Limnocene springs form a pond or lake followed by a stream and are rich in aquatic vegetation. Helocene springs make wetlands formed by diffuse runoff through silt, accumulated material, and



Sl. 1. Klase izvora prema geološkim obilježjima prema Fetteru (A – depresijski izvori; B – kontaktni izvori; C – rasjedni izvori; D – ponikvasti izvori; E – prepljevni izvori; F – izvori pukotinskih zona)

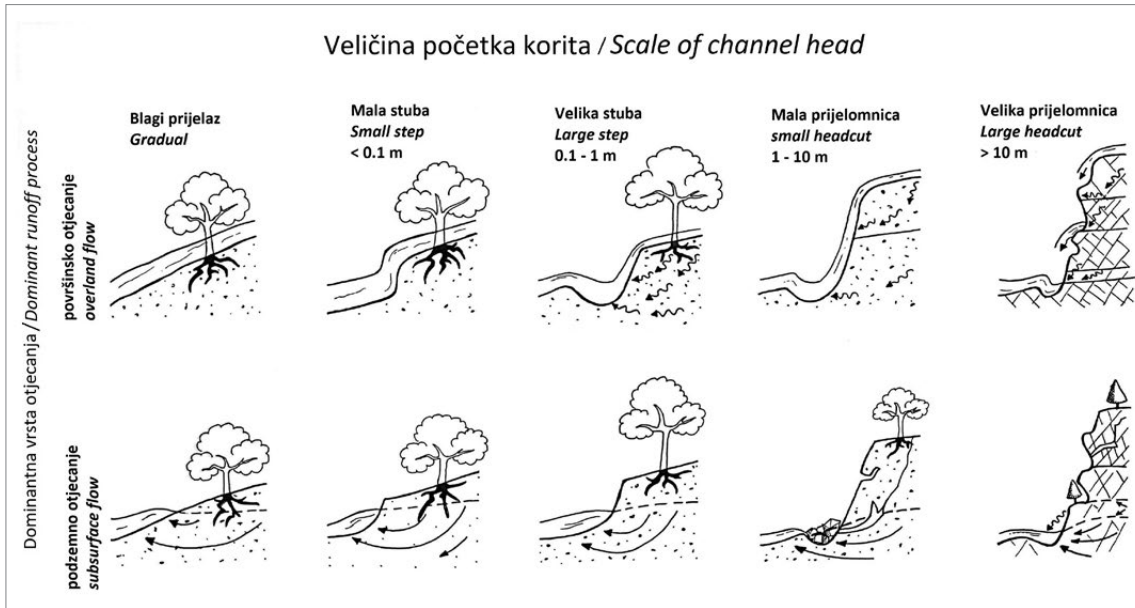
Fig. 1 Spring classes with the aspect of geological characteristics by Fetter (A - depression springs; B - contact springs; C - fault springs; D - sinkhole springs; E - joint springs; F - fracture springs)

Izvor: nacrtala Martina Martinić prema Fetter (1980)

Source: drawn by Martina Martinić after Fetter (1980)

kroz blato, akumulirani materijal i organske ostatke. Reokreni izvori obično nastaju iz jedne točke izbivanja vode nakon koje se odmah tvori korito i tekućica. Reohelokreni izvori su prijelazni oblici između reokrenih i helokrenih izvora. Reopsamokreni su oni izvori kod kojih voda difuzno istječe kroz akumulirani materijal sastavljen pretežno od pijeska i šljunka. Zadnji tip čine izvori u obliku

organic debris. Rheocrene springs usually form from a single water eruption site, after which a channel and a stream immediately emerge. Rheohelocrene springs are transitional forms between rheocrene and helocrene springs. Reopsamocrene springs are those springs in which the water flows diffusely through the accumulated material, which consists mainly of sand and gravel. The last type consists of springs in



Sl. 2. Tipologija početaka korita na temelju dubine usjecanja i dominantnoga procesa otjecanja. Ravne strelice prikazuju istjecanje temeljnice (tečenje iz zasićene zone), a valovite procjeđivanje vadozne vode (tečenje iz nezasićene zone).

Fig. 2 Typology of channel heads on the basis of incision depth and dominant runoff process. The smooth arrows indicate saturated flow and the wiggly arrows indicate unsaturated percolation, including flow through macropores.

Izvor: nacrtala Martina Martinić prema Dietrich i Dunne (1993)

Source: drawn by Martina Martinić according to Dietrich and Dunne (1993)

vodskoka, kod kojih voda uzlazno, okomito, izbija na površinu. U svom istraživanju Gerecke i Di Sabatino (1996) analiziraju sastav beskralješnjaka prema navedenim tipovima izvora. Zaključuju da je prisutnost određenih vrsta u izvorima određena tipom izvora, ali i ostalim prostornim čimbenicima, kao što je primjerice nadmorska visina.

Krški izvori ranije su često izdvajani kao posebne kategorija izvora. Ističu se po svojoj relativno velikoj izdašnosti (Dukić, 1984). Međutim, zbog svoje raznolikosti i fenomena krškoga okoliša možemo razlikovati nekoliko posebnih vrsta krških izvora, odvojeno od do sada spomenutih podjela. Gams (1974), koristeći se podjelom Makimovića (1969) dijeli krške izvore prema procesu oblikovanja te prema lokaciji na:

- I. Erozijski izvori (padinski, dolinski, terasni, u koritu)
- II. Izvori krških polja (padinski, izvori u podnožju padina, estavele)
- III. Izvori na vrhovima
- IV. Izvori na padinama

the form of fountains, where the water rises vertically to the surface. In their study, Gerecke and Di Sabatino (1996) analyzed the composition of invertebrates as a function of the aforementioned spring types. They concluded that the occurrence of certain species in springs is determined by spring type, but also by other spatial factors such as altitude.

Karst springs have often been highlighted in the past as a special category of springs. They are characterized by relatively high discharge (Dukić, 1984). Due to their diversity and the phenomena of karst environments, we can distinguish several special types of karst springs, which differ from the previously-mentioned classifications. Gams (1974), using the Makimović (1969) classification, divided karst springs according to forming process and location:

- I. Erosional springs (on slope, in valleys, on terraces, in riverbeds)
- II. Polje springs (on slopes, foothills, estavelle)
- III. Springs on hilltops
- IV. Springs on slopes

- V. Preljevni izvori
- VI. Prepriječeni nepropusnim stijenama
- VII. Prepriječeni nepropusnim sedimentom
- VIII. Prepriječeni tektonski razmještenim sedimentom
- IX. Prepriječeni još neokršenim krškim stijenama
- X. Obalni, abrazivni izvori
- XI. Potopljeni podzemski izvori slatke vode
- XII. „Morski mlinovi”
- XIII. Podzemski izvori dubokih mora
- XIV. Priobalni izvori bočatih voda
- XV. Povremeni podzemski izvori

Posebnu pozornost pridaje vruljama i estavelama, koje dijeli na jezerske i riječne te aluvijalne i rubne (Himmel, 1964 prema Gams, 1974). Po stalnosti Gams (1974) prema Gavriloviću (1970) dijeli krške izvore na periodične i neperiodične. Periodične izvore dijeli na preljevne, estavele te izvore iz podzemnih spremnika voda, a neperiodične na sezonske i izvore visokih voda. U pseudointermitentne izvore ubrajaju se oni kojima na dnevne promjene u izdašnosti utječe sočnica (Gavrilović, 1970 prema Gams, 1974). Posebno se izdvajaju povremeni izvori s „pulsirajućim” protokom.

Po kolebanju (Maksimović, 1963 prema Gams, 1974) krški izvori dijele se na izvore stalne izdašnosti, srednje promjenjive izdašnosti i jako promjenjive izdašnosti. Stalni izvori imaju koeficijent kolebanja između 1 i 2, srednje promjenjivi između 2 i 10, a jako promjenjivi od 10 do 50. Promjenjivost izdašnosti izvora računa se prema formuli $\frac{a-b}{s}$, gdje je a maksimalna izdašnost (protok), b minimalna izdašnost i s srednja izdašnost (Gams, 1974).

Dukić (1984) objedinjuje dosadašnja znanja i definira 7 tipova krških izvora, uključujući i one podzemne. Vokliški¹ su izvori jaki krški izvori iz kojih voda na kopno izlazi uzlaznim kanalima. Unatoč njihovoj velikoj izdašnosti u suhim razdobljima nije čudno da poneki od njih presuše.

¹ Vokliški izvori dobili su ime po jednom od najizdašnijih krških izvora u svijetu – *Vaucluse* u južnoj Francuskoj, tipičnom predstavniku ovoga tipa izvora.

- V. Overflow springs
- VI. Dammed by non-karstic caprock
- VII. Dammed along facial-interlaced non-karstic sediments
- VIII. Dammed along tectonically-displaced sediment
- IX. Dammed by non-karstified karstic rocks
- X. Seashore abrasive springs
- XI. Submerged submarine springs with fresh water
- XII. *Sea mills* or marine estavelles
- XIII. Deep submarine springs
- XIV. Seashore springs of brackish waters
- XV. Intermittent submarine springs

He paid special attention to springs and estavelles, dividing them into lake and river types, and alluvial and marginal types (Himmel, 1964, according to Gams, 1974). According to Gavrilović (1970), Gams (1974) divided karst springs into periodic and non-periodic. He divided periodic springs into overflowing springs, i.e. estavelles and springs of underground water reservoirs, and non-periodic springs, i.e. seasonal and high water springs. Pseudo-intermittent springs included those where daily discharge changes were influenced by glacial waters (Gavrilović, 1970, according to Gams, 1974). Occasional springs with “pulsating” flow stand out in this respect.

According to discharge fluctuations (Maksimović, 1963, according to Gams, 1974), karst springs were divided into springs with constant discharge, medium variable discharge, and highly-variable discharge. Constant springs have a coefficient of fluctuation between 1 and 2, medium-variable between 2 and 10, and highly-variable from 10 to 50. The variability of spring discharge was calculated according to the following formula: $\frac{a-b}{s}$, where a is the maximum discharge, b is the minimum discharge, and s is the average discharge (Gams, 1974).

Dukić (1984) summarized the previous findings and defined 7 types of karst springs, including submarine springs. *Vauclusean*¹ springs are large karst springs from which water reaches the mainland

¹ *Vauclusean* springs are named after one of the largest karst springs in the world – *Vaucluse* in southern France, a typical representative of this type of springs.

Povremeni su izvori oni izvori koji teku određeno vrijeme i onda naglo presuše. Prekidi i vrijeme tečenja mogu trajati od nekoliko minuta do nekoliko sati, a u vlažnijim razdobljima mogu i stalno teći. Estavele su tipovi izvora koji se javljaju u krškim poljima i koritima rijeka. U vlažnijem dijelu godine funkcioniraju kao izvori, dok su u sušem djelu godine ponori. Slana ili bočata vrela tipovi su izvora koji se javljaju na kopnu, tek nekoliko desetaka metara udaljeni od mora. Kroz podzemne pukotine dolazi do miješanja morske i slatke vode koja na koncu izbija na površinu. Vruļje su tip izvora ispod razine mora kroz koje izbija slatka ili bočata voda i obično se nalaze nedaleko od obale. Dva preostala tipa vrlo su slična vruļjama, a to su morske vodenice i morske estavele (Dukić, 1984).

Posebna vrsta krških izvora koju ističu Bonacci i Bojanić (1991) jesu ritmični izvori. Ritmični su izvori oni s pravilnim (ritmičnim) oscilacijama u izdašnosti (protoku). Pojavljuju se samo na područjima s lako topivim stijinama, odnosno na krškim područjima. Gavrilović (1967 prema Bonacci i Bojanić, 1991) daje klasifikaciju ritmičnih krških izvora:

- a) trajni ritmični izvori
- b) sezonski ritmični izvori
- c) ritmični izvori suhlih ili kišovutih razdoblja
- d) nagli ritmični izvori

U drugoj polovini 20. stoljeća razvoj računala omogućio je i razvoj digitalnih baza i klasifikacija izvora. Jedan od primjera korištenja digitalnih baza podataka jest Geološka izmjera savezne države Virdžinije (eng. *Virginia Geological Survey*), koja uključuje popis izvora Zapadne Virdžinije. Prilikom inventarizacije i klasifikacije izvora korištena je računalna baza podataka (McColloch 1986, prema Alfaro i Wallace, 1994). Prilikom inventarizacije izdašnost (protok) izvora koristio se kao glavni kriterij klasifikacije, odnosno određivanja veličine izvora. Izvori su prema tom kriteriju mogli biti veći i manji, s graničnom vrijednošću od 0,126 L/s. Također je postojala kategorija nepoznato, za one izvore čija se izdašnost nije mogla odrediti. Osim izdašnosti svakom su izvoru opisana topografska, geološka, litološka i fizikalno-ke-

through ascending channels. Despite their high flow, it is not surprising that some of them dry up during dry periods. Intermittent springs are springs which flow for a time and then abruptly dry up. The dry and wet periods may last from a few minutes to a few hours, and in wet seasons they may flow continuously. Estavelles are a type of spring that occurs in karst areas and riverbeds. In the wet seasons of the year they act as springs, while in the drier part of the year they are ponors. Salt or brackish water springs are a type of springs that originate on land, only a few dozen meters from the sea. The underground fractures cause sea water and fresh water to mix and eventually rise to the surface. Vruļjas are a type of spring found below sea level, through which fresh or brackish water flows, and are usually located not far from the coast. The two remaining types are very similar to vruļjas: namely, *sea mills* and marine estavelles (Dukić, 1984).

Rhythmic springs are a special type of karst spring singled out by Bonacci and Bojanić (1991). Rhythmic springs are springs with regular (rhythmic) variations in discharge. They occur only in areas with easily soluble rocks, i.e. in karst areas. Gavrilović (1967, according to Bonacci and Bojanić, 1991) provided a classification of rhythmic karst springs:

- a) Permanent rhythmic springs
- b) Seasonal rhythmic springs
- c) Rhythmic springs of dry or rainy periods
- d) Sudden rhythmic springs

In the second half of the 20th century, the development of computers also enabled the development of digital databases and spring classifications. An example of the use of digital databases is the Virginia Geological Survey, which contains a list of springs in West Virginia. A computer database (McColloch 1986, after Alfaro and Wallace, 1994) was used to inventory and classify springs. The inventory used spring discharge values as the primary criterion for classification, which was in turn used to determine the size of the spring. According to this criterion, springs could be larger and smaller, with a limit of 0.126 L/s. There was also a category of *unknown*, for those springs where the discharge could not be determined. In addition to discharge,

mijaska obilježja, kao i korištenje izvora i vlasništvo (Wallace Pitts i Alfaro, 2001).

Krajem 20. stoljeća mnoge institucije (pretežno u Sjevernoj Americi) krenule su s inventarizacijom izvora, njihovom klasifikacijom i stvaranjem baza podataka. Vineyard i dr. (1982) detaljno opisuju izvore savezne države Missouri, a njihov primjer slijedi i Borneuf (1983) na području kanadske savezne države Alberta. U obama radovima primijenjene su i osnovne klasifikacije izvora na temelju Meinzera i Bryana.

Problem, prisutan i danas, jest nepostojanje ujednačena sustava inventarizacije i klasifikacije izvora te manjak koordinacije između istraživača međusobno, kao i između istraživača i institucija (Alfaro i Wallace, 1994; Stevens i dr., 2021). Zbog toga bi bilo dobro postaviti standarde inventarizacije i klasifikacije izvora na nacionalnoj, ali i međunarodnoj razini.

Suvremene klasifikacije izvora

U zadnjih dvadesetak godina interdisciplinarni pristupi klasifikacijama izvora sve se više razvijaju. Pristupi koji povezuju obilježja izvora s gledišta različitih struka korišteni su za definiranje tipova izvora na lokalnim i regionalnim razinama (Zollhöfer i dr., 2000; Spitale i dr., 2012; Martin i Brunke, 2012). Također se javlja inicijativa određivanja globalnoga standarda za inventarizaciju i klasifikaciju izvora (Springer i dr., 2008; Springer i Stevens, 2009).

Zollhöfer i dr. (2000) proveli su tipizaciju izvora na području Švicarske visoravni i Jurskoga gorja koristeći se integracijom stanišnih obilježja i faune izvora. Stanišna obilježja odnose se na spomenute ekološke tipove izvora Steinmanna i Thienemanna, ali uključuju i geološka obilježja te obilježja supstrata. Određeno je 6 tipova izvora na temelju abiotičkih čimbenika, a to su: a) krški reokreni, b) reokreni na konsolidiranom vapnenačkom materijalu, c) reokreni na nekonsolidiranom materijalu, d) linearni, e) aluvijalni reokreni, f) limnokreni. Većina tipova međusobno se razlikovala i po sastavu analiziranih vrsta makrobeskralješnjaka. Razlika između aluvijalnih reokrenih i reokrenih na ne-

each spring was described with topographic, geologic, lithologic, and physicochemical characteristics, as well as spring use and ownership (Wallace Pitts and Alfaro, 2001).

In the late 20th century, many institutions (especially in North America) began to inventory springs, classify them, and create spring databases. Vineyard et al. (1982) described Missouri's springs in detail, followed by Borneuf (1983) in Alberta. Both papers used basic spring classifications based on Meinzer and Bryan.

The problem that persists to this day is the lack of a uniform system for inventory and classification of springs, as well as the lack of coordination between individual researchers and between researchers and institutions (Alfaro and Wallace, 1994; Stevens et al., 2021). Therefore, it would be a *great benefit* to establish national and international standards for inventory and classification of springs.

Modern spring classifications

Over the past twenty years, interdisciplinary approaches to spring classification have become more prevalent. Approaches that combine spring characteristics from various scientific and/or professional aspects have been used to define spring types at local and regional scales (Zollhöfer et al., 2000; Spitale et al., 2012; Martin and Brunke, 2012). There is also an initiative to establish a global standard for spring inventory and classification (Springer et al., 2008; Springer and Stevens, 2009).

Zollhöfer et al. (2000) classified springs in the Swiss Plateau and Jura Mountains based on the integration of habitat characteristics and spring fauna. Habitat characteristics refer to the ecological types of springs defined by Steinmann and Thienemann, but also include geological and substrate characteristics. Based on abiotic factors, 6 spring types were determined: a) karst rheocrenes; b) lime-sinter rheocrenes; c) unsintered rheocrenes; d) linear; e) alluvial rheocrenes; and f) limnocrene. Most types also differed in terms of the composition of the macroinvertebrate species analyzed. The difference between alluvial rheocrenes and unsin-

konsolidiranom materijalu bila je manje izražena, kao i kod linearnih i reokrenih na konsolidiranom vapnenačkom materijalu.

Martin i Brunke (2012) proveli su vrlo slično istraživanje, samo na drugom području. Proveli su prvu tipizaciju nizinskih izvora na području Njemačke, koristeći se stanišnim tipovima izvora, fizikalno-kemijskim obilježjima izvora i podacima o fauni. Točnije, istraživali su povezanost fizikalno-kemijskih varijabla i taksonomskih skupina makrobekralješnjaka te postojanje razlika u obilježjima faune među tipovima izvora. Slično kao i u radu Zöllhöfer et al. (2000), kao polazišni tipovi izvora koriste se uobičajene tri klase izvora: reokreni, limnokreni i helokreni. Osim njih Martin i Brunke definiraju i hibridni tip – reohelokrene izvore. Rezultati su pokazali kako postoje značajne razlike u sastavu vrsta između svih nabrojanih tipova izvora. Zaključeno je da sastav vrsta uvelike ovisi o vrsti supstrata na izvoru. Što se tiče bogatstva vrsta, kod reokrenih, helokrenih i reohelokrenih ona je podjednaka, dok je kod limnokrenih znatno niža od prethodnih triju tipova. Autori zaključuju da su ovako definirani tipovi primjenjivi u istraživanom području u vidu upravljanja i potencijalne restauracije degradiranih izvora.

Spitale i dr. (2012) istraživali su i klasificirali izvore jugoistočnih Alpa u talijanskoj autonomnoj pokrajini Trident. Prilikom svoje klasifikacije također su pokušali povezati nekoliko abiotičkih obilježja s biotičkim. Kao osnova klasifikacije i podjele izvora ponovno je korištena podjela na reokrene, limnokrene i helokrene izvore. Služeći se statističkom klusterskom analizom abiotičkih obilježja kao što su pH vode, protok, nadmorska visina i dr., dobiveno je sedam tipova izvora: 1) limnokreni, 2) helokreni, 3) reokreni visokih nadmorskih visina na karbonatnim stijenama, 4) reokreni niskih nadmorskih visina na karbonatnim stijenama, 5) reokreni na silikatnim stijenama, 6) reokreni s visokim protokom te 7) higropetrični reokreni izvori. Autori smatraju kako su dani tipovi reprezentativni za cijelo područje talijanskih Alpa. Za razliku od prijašnjih radova, gdje se uglavnom koristila jedna ili dvije taksonomske skupine, klase izvora uspoređivane su s podacima o fauni iz većega broja taksonomskih skupina. Rezultati su poka-

tered rheocrenes was less pronounced, as was the difference between linear and lime-sintered rheocrenes.

Martin and Brunke (2012) conducted a very similar study, but in a different area. They conducted the first typology of lowland springs in Germany, using habitat types, physicochemical characteristics, and faunal data. In particular, they examined the relationship between physicochemical variables and taxonomic groups of macroinvertebrates, as well as the presence of differences in faunal characteristics among spring types. Similar to the work of Zöllhöfer et al. (2000), the usual 3 classes of springs are used as a starting point: rheocene, limnocrene, and helocene. In addition to these, Martin and Brunke also define a hybrid type—rheohelocene springs. The results showed that there are significant differences in species composition among all listed spring types. It was concluded that species composition largely depended on the type of substrate of the spring. Regarding species richness, it was the same in rheocene, helocene, and rheohelocene springs, while it was much lower in limnocrene springs. They concluded the types, thus-defined, to be applicable in research area in terms of management and potential restoration of degraded springs.

Spitale et al. (2012) studied and classified springs in the southeastern Alps in the autonomous Italian province of Trento. In their classification, they also tried to relate several abiotic features to biotic ones. The classification of springs into rheocene, limnocrene, and helocene was again used as a basis for classification and categorization. Using statistical cluster analysis of abiotic characteristics such as water pH, discharge, elevation, etc., 7 types of springs were identified: 1) limnocrene; 2) helocene; 3) rheocene at high altitudes on carbonate rocks; 4) rheocene at low altitudes on carbonate rocks; 5) rheocene on siliceous rocks; 6) rheocene with high discharge; and 7) hygropetric rheocene springs. The authors consider the indicated types to be representative for the entire area of the Italian Alps. In contrast to previous works, which mainly used one or two taxonomic groups, the spring classes were compared with faunal data from a range of taxonomic groups. The results showed that the spring types defined in this way allowed the predic-

zali da ovako definirani tipovi izvora omogućuju predviđanje faunalnih vrsta iz više taksonomskih skupina, ali ne iz svih.

Vidljivo je da tri spomenuta istraživanja imaju velike sličnosti u metodama, ali i rezultatima. Njihov je primarni cilj bio razviti klasifikaciju izvora na temelju abiotičkih čimbenika koji čine posebna staništa za određene skupine makrobekskralješnjaka. U svim trima istraživanjima kao osnovna klasifikacija korištena je ona Thienemanna i Steinmanna, odnosno podjela izvora na reokrene, limnokrene i helokrene izvore. Potom su na temelju određenih abiotičkih faktora u kombinaciji s trima navedenim klasama izvora određeni novi tipovi izvora, karakteristični za istraživano područje. Primjenjivost određene tipologije izvora testirana je određivanjem faunalne posebnosti svakoga od tipova, na temelju sastava vrsta makrobekskralješnjaka. Na temelju ovih triju istraživanja možemo zaključiti da je ovakav (interdisciplinarni) pristup klasifikaciji izvora primjenjiv za povezivanje abiotičkih i biotičkih obilježja. Uz pomoć adekvatne abiotičke, odnosno stanišne klasifikacije moguće je predvidjeti pojavnost ciljanih taksonomskih skupina. Ovakva su istraživanja bitna za kvalitetno upravljanje izvorima, a posebno za njihovu zaštitu i restauraciju.

Prilikom razvijanja interdisciplinarnih istraživanja i klasifikacija izvora svakako je potrebno spomenuti radove znanstvenika iz Instituta za upravljanje izvorima (*Spring Stewardship Institute*) iz Arizone. Za razliku od prethodnih radova koji razvijaju klasifikacije izvora s obzirom na regionalna obilježja, cilj je znanstvenika Instituta razviti sustav prikupljanja podataka o obilježjima izvora te predložiti sveobuhvatnu klasifikaciju izvora primjenjivu na globalnoj razini. Na potrebu za globalnom klasifikacijom i bazom podataka upozorili su već ranije Alfaro i Wallace (1994). Prijedlog osnovne klasifikacije, primjenjive na globalnoj razini, iznesen je u nekoliko radova (Springer i dr., 2008; Springer i Stevens, 2009; Stevens i dr., 2021). Na temelju odabranih geoloških, hidroloških i ekoloških obilježja određeno je 12 oglednih tipova izvora (sl. 3). Bitno je napomenuti da su iz ove klasifikacije izuzete tzv. pištaline (eng. *seepage springs*), odnosno procijedni izvori relativno male

tion of faunal species from some taxonomic groups, but not from others.

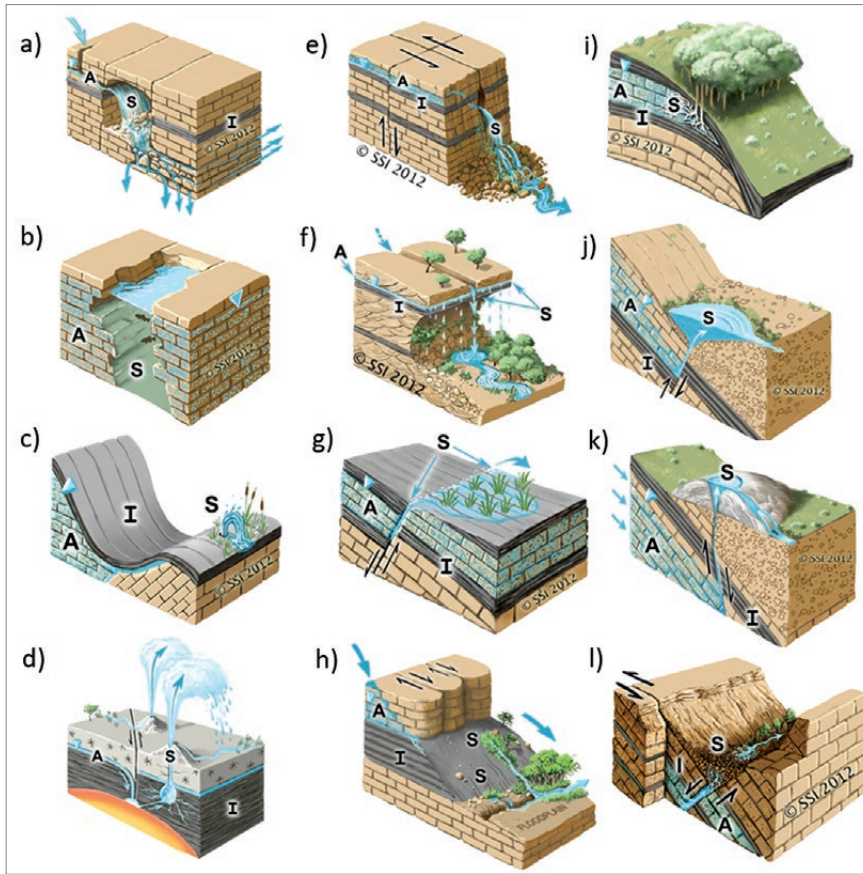
The three aforementioned studies have great similarities in their methods, and also in their results. Their primary goal was to develop a classification of springs based on abiotic factors that make up particular habitats for particular groups of macroinvertebrates. In all three studies, the basic classification used was that of Thienemann and Steinmann, i.e. springs classified as rheocrenes, limnocrenes, and helocrenes. Then, based on certain abiotic factors in combination with the three classes of springs mentioned above, new types of springs characteristic for the study area were determined. The applicability of a particular spring typology was tested by determining the fauna specificity of each type based on macroinvertebrate species composition. Based on these three studies, we can conclude that this (interdisciplinary) approach to spring classification is suitable for linking abiotic and biotic features. With the help of adequate abiotic, i.e. habitat, classification, it is possible to predict the occurrence of certain taxonomic groups. This research is important for quality spring management and especially for spring protection and restoration.

In developing interdisciplinary research and spring classifications, it is necessary to mention the work of scholars at the Spring Stewardship Institute in Arizona. Unlike the previous papers in this chapter that developed classifications of springs in terms of regional characteristics, the Institute's scientists are attempting to develop a system for collecting data on spring characteristics in order to propose a comprehensive spring classification system that can be applied globally. The need for a global classification and database has already been highlighted by Alfaro and Wallace (1994). A proposal for a basic, globally-applicable classification system has been presented in several publications (Springer et al., 2008; Springer and Stevens, 2009; Stevens et al., 2021). Based on selected geological, hydrological and ecological characteristics, 12 types of springs were identified (Fig. 3). It is important to note that so-called seepage springs, i.e. springs with relatively low discharge and short residence time of water in the ground, were excluded from the classification. The spring types were defined on the basis

Sl. 3. Tipovi izvora prema Springeru i Stevensu: a) špiljski, b) otvoreni, c) arteški, d) gejzir, e) koncentrirani horizontalni, f) procjedni horizontalni, g) helokreni, h) padinski, i) hipokreni, j) limnokreni, k) oblik humka, l) reokreni (slovo A označuje vodonosnik, slovo I nepropusnu barijeru (akvitard), a slovo S mjesto izlaska vode na površinu).

Fig. 3 Types of springs according to Springer and Stevens: a) cave; b) exposure; c) fountain; d) geyser; e) gusher; f) hanging garden; g) helocrene; h) hillslope; i) hypocrene; j) limnocrene; k) mound form; and l) rheocrene (the letter A stands for aquifer, I for impermeable infiltration barrier (aquitard), and S for surface groundwater expression (spring source)).

Izvor: Stevens i dr., (2021) (nacrtao Victor Leshyk, korišteno uz dopuštenje L. E. Stevensa)
Source: Stevens et al., (2021) (drawn by Victor Leshyk, presented with the approval of L. E. Stevens)



izdašnosti i kratka zadržavanja vode u podzemlju. Tipovi izvora definirani su na temelju okruženja u kojem se nalaze, odnosno koje oblikuju (tab. 3).

Predloženi tipovi izvora zapravo bi trebali služiti kao osnova za kasniju detaljniju klasifikaciju izvora, temeljenu na globalno prikupljenim podacima. Predložen je i protokol za ujednačeno prikupljanje koji nudi upute o tome koje podatke prikupljati i na koji način (Stevens i dr., 2016).

Među predloženim tipovima izvora vidljivo je da su određeni tipovi isti ili slični nekim prethodno definiranim tipovima, kao što su limnokreni, reokreni i helokreni izvori, gejziri i špiljski izvori. Ostali opisani tipovi izvedeni su na temelju posebnih obilježja vodonosnika, ali i okruženja u kojem voda istječe iz podzemlja. Najveći je doprinos klasifikacije spajanje interdisciplinarnih obilježja izvora te objedinjavanje novih i starijih, već dugo korištenih tipova izvora iz različitih struka.

of the environment in which they were located, i.e. point of origin (Tab. 3).

The proposed types of springs were intended to serve as a basis for a subsequent, more detailed classification of springs, based on data collected worldwide. A protocol for uniform collection has also been proposed, which would provide guidance on which data to collect and how (Stevens et al., 2016).

Among the proposed spring types, it can be seen that certain types are similar or identical to some predefined types, such as limnocrene, rheocrene and helocrene springs, geysers, and cave springs. The other types described were derived based on specific characteristics of aquifers, as well as the environment where water emerges from the ground. The greatest contribution of this classification is its merger of interdisciplinary characteristics of springs and the unification of new spring types with older, multi-disciplinary types that have long been in use.

Tab. 3. Tipovi izvora prema Springeru i Stevensu i njihovi opisi
Tab. 3 Types of springs according to Springer and Stevens and their descriptions

Tip izvora / Spring type	Opis / Description
Špiljski / Cave	Pojavljuju se u špiljama na izrazito okršenom prostoru, s dovoljno velikim provodnikom. / Emergence in a cave in mature to extreme karst with sufficiently large conduits.
Izloženi / Exposure	Otvori u špiljama, stijenama ili ponikvama gdje je otvoreni vodonosnik izložen površini tla. / Cave, rock shelter fractures, or sinkholes where unconfined aquifer is exposed near the land surface.
Arteški / Fountain	Arteški izvori gdje voda obogaćena CO ₂ izbija poput vodoskoka pod tlakom iz zatvorenoga vodonosnika. / Artesian fountain with pressurized CO ₂ in a confined aquifer.
Gejziri / Geysers	Eksplozivni izvor vruće vode iz zatvorenoga vodonosnika. / Explosive flow of hot water from confined aquifer.
Koncentrirani horizontalni / Gusher	Tok vode izvire iz okomite stijene, iz otvorenoga vodonosnika. / Discrete source flow gushes from a cliff wall of a perched, unconfined aquifer.
Procjedni horizontalni / Hanging garden	Tok manje snage obično izlazi vodoravno, duž geološkoga kontakta, preko ruba okomite stijene iz otvorenoga vodonosnika. / Dripping flow emerging (usually) horizontally along a geologic contact along a cliff wall of a perched, unconfined aquifer.
Helokreni / Helocrene	Voda izvire iz blago nagnuta močvarnoga područja; često morfološki neizraženi ili voda prodire iz više manjih otvora iz plitkoga, otvorenoga vodonosnika. / Emerges from low gradient wetlands; often indistinct or multiple sources seeping from shallow, unconfined aquifers.
Padinski / Hillslope	Voda izlazi iz zatvorenoga ili otvorenoga vodonosnika na padini (nagib 30–60°); često morfološki neizraženi ili voda izlazi iz više manjih otvora. / Emerges from confined or unconfined aquifers on a hillslope (30–60° slope); often indistinct or multiple sources.
Hipokreni / Hypocrene	Ukopani izvor gdje voda ne doseže površinu, obično zbog vrlo niske izdašnosti i jake evapotranspiracije. / A buried spring where flow does not reach the surface, typically due to very low discharge and high evaporation or transpiration.
Limnokreni / Limnocrene	Jezerasti ili lokvasti izvori zatvorenih i otvorenih vodonosnika. / Emergence of confined or unconfined aquifers in pool(s).
Oblik humka / Mound form	Voda izlazi iz mineraliziranoga humka, često na magmatskim ili rasjednim sustavima. / Emerges from a mineralized mound, frequently at magmatic or fault systems.
Reokreni / Rheocrene	Voda koja izvire otječe tvoreći jedno ili više korita. / Flowing spring, emerges into one or more stream channels.

Izvor: Springer i Stevens (2009)
Source: Springer and Stevens (2009)

Suvremena istraživanja izvora u svijetu

Unatoč sve većem broju interdisciplinarnih istraživanja i dalje postoje osnovna istraživanja izvora u kojima se koriste pristupi samo određenih struka. Potreba za takvim fundamentalnim istraživanjima i dalje je velika zbog nedostatka osnovnih podataka o izvorima (Stevens i dr., 2021). Primjer suvremenih temeljnih istraživanja jesu kartiranje izvora i analiza njihova prostornoga rasporeda, istraživanja hidroloških obilježja izvora, geomorfoloških obilježja izvorišnih obluka i prostora u kojima se izvori pojavljuju, hidrogeoloških obilježja vodonosnika izvora, fizikalno-kemijskih obilježja vode, određivanje biljnih i životinjskih vrsta u izvorima i dr. U ovom poglavlju navedeni su primjeri češćih suvremenih istraživanja izvora, u kojima su zastupljeni različiti pristupi istraživanju. Rezultati takvih istraživanja potencijalno mogu biti vrijedni za stvaranje novih klasifikacija i tipova izvora.

U istraživanjima izvora, bez obzira na korišten pristup, gotovo je nemoguće izostaviti njihova hidrološka obilježja. Istraživanja hidroloških obilježja međusobno se razlikuju ovisno o broju, vrsti i veličini istraživanih izvora te namjeni istraživanja. Najčešća hidrološka istraživanja obuhvaćaju određivanje režima izvora, izdašnosti izvora i brzine njihove reakcije na padaline (Negi i Joshi, 2004; Vashisht i Sharma, 2007). Često se analiziraju hidrografi izvora, odnosno recesijske krivulje (Kovács i Perrochet, 2008; Vashisht i Bam, 2013; Giacometti i dr., 2017). Upravo se analizama hidroloških obilježja izvora mogu odrediti određena svojstva vodonosnika (Birk i Hergarten, 2012; Fiorillo, 2014; Mostowik i dr., 2016). Danas u vrijeme klimatskih promjena vrlo su važna istraživanja koja prate promjene izdašnosti izvora, pogotovo u prostorima s naglim promjenama hidroloških prilika posljednjih dvaju desetljeća, kao što su primjerice prostori Himalaje (Tambe i dr., 2012; Agarwal i dr., 2012). Istraživanja utjecaja klimatskih promjena na izvore prvenstveno procjenjuju utjecaj promjene u režimima padalina na promjenu režima otjecanja iz izvora. Analize krivulja otjecanja korisne su prilikom matematičkih modeliranja režima otjecanja izvora (Vashisht i Sharma, 2007). Rehr i Birk (2010) u svom preglednom radu opisuju složenost procesa izrade hidrogeoloških modela sli-

Modern research on springs in the world

Despite the growing amount of interdisciplinary research, there is still basic research of springs that uses only approaches that are specific to a given profession. The need for such fundamental research is still great due to the lack of basic data on springs (Stevens et al., 2021). Examples of modern fundamental research include mapping of springs and analysis of their spatial distribution, research of hydrological characteristics of springs, geomorphological characteristics of spring heads and spring zones, hydrogeological characteristics of aquifers, physicochemical properties of water, identification of plant and animal species in springs, etc. This section provides examples of common modern spring research, in which various research approaches are represented. The results of such research could be potentially valuable in creating new classifications and typologies of springs.

In research of springs, whatever the approach, hydrological characteristics cannot be overlooked. Research of hydrological characteristics differs depending on the number, type, and size of springs studied and the purpose of the research. The most common hydrological surveys include determination of spring regime, spring discharge, and rate of response to precipitation (Negi and Joshi, 2004; Vashisht and Sharma, 2007). Spring hydrographs, i.e. recession curves, are frequently analyzed (Kovács and Perrochet, 2008; Vashisht and Bam, 2013; Giacometti et al., 2017). By analyzing the hydrological characteristics of a spring, certain aquifer properties can be determined (Birk and Hergarten, 2012; Fiorillo, 2014; Mostowik et al., 2016). Today, in times of climate change, research on monitoring changes in spring discharge is very important, especially in areas which have documented sharp changes in hydrological conditions over the last two decades, such as the Himalayas (Tambe et al., 2012; Agarwal et al., 2012). Research on the effects of climate change on springs primarily examines the effects of changes in precipitation regimes on changes in spring runoff. Analyses of runoff curves are useful in mathematical modeling of spring runoff regimes (Vashisht and Sharma, 2007). In their review paper, Rehr and Birk (2010) described the complexity of the process of building hydrogeolog-

**Pregled klasifikacija
i suvremenih
istraživanja izvora u
svijetu i Hrvatskoj**

*An overview of
classifications and
modern research of
springs in the world
and in Croatia*

jevnih područja izvora, odnosno modela otjecanja izvora. Uspoređuju primjenu tzv. globalnih modela i modela raspodijeljenih parametara. Potonji se češće koriste, no za njih su potrebna dodatna terenska istraživanja koja katkad nisu moguća (Rehrl i Birk, 2010).

Geološka i hidrogeološka obilježja prostora, odnosno vodonosnika drugi su ključan segment prilikom istraživanja izvora. Najčešće su hidrološka i hidrogeološka istraživanja vrlo usko povezana, a izvori se proučavaju kao indikator hidrogeoloških obilježja vodonosnika. Manga (2001) u svojem radu donosi pregled tehnika i pristupa u kojima se izvori koriste za proučavanje podzemnih tokova i aktivnih geoloških procesa. U radu je predstavljeno na koji način se koristeći trasi-ranje, podatke o temperaturi vode izvora te mjerenje izdašnosti može odrediti prosječno vrijeme zadržavanja vode u podzemlju, donijeti zaključci vezano za kretanje podzemnih voda, procijeniti zalihe vodonosnika te odrediti hidraulička svojstva i druga hidrogeološka obilježja prostora. Nekom od navedenih metoda koriste se Cervi i dr. (2014) na području Apenina. Praćenjem protoka u rijekama i izvorima zajedno s procjenom bilance podzemnih voda odredili su prirodu punjenja istraživanoga vodonosnika te definirali njegove hidrogeološke granice. Na sličan način Mostowik i dr. (2021) definiraju obrasce punjenja vodonosnika i obilježja podzemnih tokova te brzinu reakcije izvora na padaline. Kontinuirano su pratili izdašnost, temperaturu i specifičnu električnu vodljivost vode triju odabranih izvora te su analizirali povezanost mjerenih parametara s količinom padalina.

Kartiranje, odnosno određivanje lokacija izvora treća je bitna stavka za analiziranje obilježja izvora. Pojedini izvori, posebno oni veći i izraženi u prostoru (npr. veliki krški izvori) relativno su lako fizički dostupni te njihovo kartiranje i određivanje lokacije nije problematično. Međutim, brojni izvori male izdašnosti (ne i manje važnosti) vrlo su teško dostupni, bilo zbog vegetacije bilo zbog konfiguracije terena na kojem se nalaze. Također, njihov je broj često vrlo velik na malom prostoru, stoga ih je teško fizički obići i odrediti njihov položaj. Corsini i dr. (2009) kartirali su oko 200

ical models of spring catchment areas, i.e. spring runoff models. They compared the use of so-called global models and distributed parameter models. The latter are more commonly used, but require additional field research, which is sometimes not possible (Rehrl and Birk, 2010).

Geological and hydrogeological characteristics of an area, i.e. its aquifers, are another important segment in the study of springs. Hydrological and hydrogeological studies are very closely related and springs are studied as an indicator of the hydrogeological characteristics of the aquifers. Manga (2001) gave an overview of the techniques and approaches by which springs were used to study underground flows and active geological processes. The paper presented how tracing, spring water temperature data, and discharge measurements could be used to determine the average residence time of groundwater, draw conclusions about groundwater movement, estimate aquifer reserves, and determine the hydraulic properties and other hydrogeological characteristics of the area. Some of the aforementioned methods were used by Cervi et al. (2014) in the Apennine area. By monitoring flow in rivers and springs together with the assessment of the groundwater balance, they determined how the studied aquifer was filled and defined its hydrogeological boundaries. Similarly, Mostowik et al. (2021) defined the fill patterns of an aquifer and the characteristics of groundwater flow and the response rate of springs to precipitation. They continuously monitored water discharge, water temperature, and specific electrical conductivity of three selected springs and analyzed the relationship between the measured parameters and the amount of precipitation.

Mapping, i.e. determining the location of springs, is the third important point in analyzing the characteristics of springs. Some springs, especially larger and spatially-distinct springs (e.g. large karst springs), are relatively easy to access and map. However, numerous low-discharge springs are very difficult to access, either because of vegetation or the configuration of the terrain in which they are located. Moreover, there can be many such springs in a relatively small area, making it difficult to physically access and map them. Corsini et al.

izvora na području sjevernih Apenina u Italiji. Na temelju prikupljenih podataka testirali su dva alata za predviđanje lokacije nekartiranih izvora preko računalnih GIS programa. Rezultati su pokazali da korišteni alati, odnosno modeli dobro predviđaju lokacije izvora, posebno kad se preklapaju dobiveni rezultati obaju alata. Niraula i dr. (2021) služe se računalnom kombinacijom GIS-a i strojnoga učenja korištenjem nekoliko metoda s ciljem razvoja modela za predviđanje lokacija izvora na područjima za koja nedostaju podaci. Prilikom istraživanja korišteno je 20 varijabli, uključujući geološka, topografska i hidrološka obilježja testiranoga prostora. Metodama treninga i validacije rezultata pokazalo se kako rezultati variraju ovisno o metodama. Najuspješnija metoda pružila je točnost od 94 %. Płaczkowska i dr. (2021) koriste se digitalnim modelima reljefa vrlo visokih rezolucija, dobivenih korištenjem LiDAR tehnika, za određivanje početaka korita. Istraživanje je pokazalo da je za pouzdano daljinsko analiziranje geomorfoloških obilježja početaka korita potreban digitalni model reljefa rezolucije od najmanje 10 centimetara. Autori zaključuju da su za određivanje lokacija početaka korita, odnosno izvora i određivanje njihove slijevne površine primjenjivi i ostali analizirani modeli reljefa (rezolucije do 1 m), ali im je pouzdanost i preciznost manja. Navedena istraživanja pokazuju da razvoj tehnologije može imati važnu ulogu u kartiranju izvora te da će se razvojem novih metoda i preciznijih modela reljefa takvi pristupi sve više upotrebljavati.

Unatoč navedenim iskoracima razvoj tehnologije u posljednjih dvadesetak godina nije smanjio važnost terenskoga istraživanja, čak i za potrebe kartiranja izvora. U istraživanjima Płaczkowske i dr. (2015) te Mocior i dr. (2015) terenski je kartirano oko 400 izvora. Płaczkowska i dr. (2015) u svojem istraživanju analiziraju prostorni raspored početaka korita (eng. *channel heads*) na području Beskida, dok Mocior i dr. (2015) analiziraju uvjetovanje rasporeda izvora na istom području. Zaključak je obaju radova da se prostorni raspored i gustoća izvora ne mogu jednostavno povezati s određenim geomorfološkim obilježjem. Njihov je nastanak uvjetovan brojnim čimbenicima, od-

(2009) mapped about 200 springs in the northern Apennines in Italy. Based on the collected data, they tested two tools to predict the location of unmapped springs via GIS software. The results showed that the tools used, i.e. the models, predicted the location of the springs well, especially when the results of both tools overlapped. Niraula et al. (2021) used a combination of GIS and machine learning with different methods to develop models to predict spring locations in areas where no data are available. Twenty variables were used in the study, including geological, topographical, and hydrological characteristics of the study area. The methods used to train and validate the models showed that the results varied depending on the method. The most successful method provided 94% accuracy. Płaczkowska et al. (2021) used very high-resolution digital relief models obtained by LiDAR techniques to determine channel head locations. The study showed that a digital relief model with a resolution of at least 10 centimeters would be required for reliable remote analysis of the geomorphological features of the start of the bed. The authors concluded that although other analyzed relief models (resolution up to 1 m) were suitable for determining the location of the channel heads, i.e. the spring and determination of its catchment area, their reliability and accuracy were lower. These studies showed that the development of technology can play an important role in mapping springs and that with the development of new methods and more accurate relief models, such approaches will be increasingly used.

Nevertheless, the development of technology in the last twenty years has not diminished the importance of field research, even when it comes to mapping springs. In the research of Płaczkowska et al. (2015) and Mocior et al. (2015), about 400 springs were mapped in the field. In their research, Płaczkowska et al. (2015) analyzed the spatial distribution of channel heads in the Beskydy Mountains, while Mocior et al. (2015) analyzed the determinants of distribution of springs in the same area. The conclusion of both papers was that the spatial distribution and density of springs could not be related to a particular geomorphological feature in a simple manner. Their formation was

nosno njihovom kombinacijom, a glavni utjecaj imaju geološka obilježja prostora. Istraživanje Buczyńskoga i Rzonca (2018) primjer je objedinjavanja geološkoga i hidrološkog tipa istraživanja zajedno s analiziranjem prostornoga rasporeda. Autori utvrđuju pravilnosti u prostornom rasporedu izvora u odnosu na litologiju, rasjede i tektonske diskontinuitete. Pokušavaju k tomu utvrditi kako su izdašnosti izvora, temperatura i specifična vodljivost vode povezane s istraživanim geološkim obilježjima prostora. Povezivanje erozijskih procesa na padinama s nastankom izvora istražuje Mazurek (2017). To je istraživanje pokazalo da veličina i oblik izvorišnih obluka ovise o aktivnim fluviodenudacijskim procesima.

Podmorski izvori (vrulje) karakteristični su za krška područja, a zbog svoje prirode vrlo su složen objekt proučavanja. Katkad zahtijevaju složena speleoronička istraživanja (Buzjak i dr., 2013) u svrhu izrade speleoloških nacrti i istraživanja geomorfoloških obilježja. Podmorski izvori često se istražuju zajedno s priobalnim izvorima jer su morfogenetski procesi njihova nastanka usko povezani (Benac i dr. 2003; Surić, 2005; Horvat i Rubinić, 2021). Korištenjem tehnologije razvijaju se nove metode istraživanja i otkrivanja podmorskih izvora. Korištenja daljinskih istraživanja dobar su primjer novih tehnologija. Tako se primjerice Wilson i Rocha (2012) služe satelitskim snimkama za procjenu izdašnosti podmorskih izvora, a Horvat i Rubinić (2021) procjenjuju upotrebljivost termalnih infracrvenih snimaka za procjenu vodnoga potencijala krških vodonošnika podmorskih izvora. Vrijednost podmorskih slatkovodnih izvora ističe se na područjima gdje su slatkovodni vodni resursi relativno oskudni na kopnu. Tako primjerice Ayoub i dr. (2002) istražuju izvedivost iskorištavanja podmorskih izvora na području Libanona, a DiNapoli i dr. (2021), koristeći se termalnim snimkama, povezuju naselja i građevine starih civilizacija vodom oskudna Uskršnjeg otoka s podmorskim izvorima. Podmorski izvori stvaraju i posebnu vrstu staništa, što ih čini zanimljivim objektom proučavanja i s biološkoga gledišta. Tako primjerice Novosel i dr. (2005) te Cocito i dr. (2006) istražuju koraljne vrste koje rastu upravo uz vrulje. Za istraživanje

conditioned by numerous factors, i.e. a combination of factors, and the main influence was exerted by the geological features of the area. The research of Buczyński and Rzonca (2018) is an example of combining geological and hydrological studies with spatial distribution analysis. The authors identified regularities in the spatial distribution of springs in relation to lithology, faults, and tectonic discontinuities. They also attempted to determine how spring discharge, temperature, and specific water conductivity were related to the geologic features of the study area. Mazurek (2017) investigated the relationship between erosional processes on slopes and the formation of springs. Their research showed that the size and shape of spring heads depended on active hydrogeomorphic processes.

Underwater springs (vruljas) are characteristic of karst areas and, due to their nature, are a very complex object of study. Sometimes complex speleological (speleodiving) research (Buzjak et al., 2013) is required, in order to map and research their geomorphological features. Submarine springs are often studied together with coastal springs since the morphogenetic processes of their formation are closely related (Benac et al. 2003; Surić, 2005; Horvat and Rubinić, 2021). Technology is being used to develop new methods for research and discovery of submarine springs. The use of remote sensing is a good example of this. For example, Wilson and Rocha (2012) used satellite imagery to estimate the abundance of submarine springs, and Horvat and Rubinić (2021) estimated the utility of thermal infrared imagery to assess the water potential of karst aquifers of submarine springs. The value of submarine freshwater resources stands out in areas where freshwater resources on land are relatively scarce. For example, Ayoub et al. (2002) studied the possibility of exploiting submarine resources in Lebanon; and DiNapoli et al. (2021), using thermal images, linked the locations of settlements and buildings of ancient civilizations of the water-scarce Easter Island with submarine springs. Submarine springs also form a special type of habitat, which makes them an interesting object of study from a biological point of view. For example, Novosel et al. (2005) and Cocito et al. (2006)

podmorskih izvora, zbog njihove složenosti, poželjan je interdisciplinarni pristup.

Ekološka istraživanja izvora dobar su primjer primijenjenih interdisciplinarnih pristupa istraživanju izvora općenito. Istražuje se utjecaj čovjekovih djelatnosti te abiotičkih čimbenika kao što su izdašnost, fizikalno-kemijska obilježja vode, geomorfološka obilježja ili oblik staništa na biološko stanje izvora. Sinclair (2018) povezuje raznolikost u geomorfološkim oblicima izvora i njihovu biološku raznolikost. Potvrdio je da geomorfološka raznolikost izvora ima pozitivan utjecaj na raznolikost vrsta u izvoru. Rabeći tipove Springera i Stevensa (2009), analizira bogatstvo vrsta i razlike u sastavu vrsta između tipova. Upućuje na problem ljudskoga utjecaja i na posebnosti pojedinih tipova izvora, odnosno njihovu veliku različitost.

Von Fumetti i dr. (2006; 2012; 2017) istražuju utjecaje varijabilnosti protoka (izdašnosti) izvora te temperature vode izvora na makrobekralješnjake. Općenito gledajući, stabilniji uvjeti uvjetuju stabilniji broj vrsta i jedinki vrsta, dok izvori s velikom varijabilnosti hidroloških i fizikalno-kemijskih uvjeta za posljedicu imaju i veću varijabilnost u broju jedinki, ali imaju i veći ukupni broj zabilježenih vrsta. Ekstremni uvjeti tijekom godine, kao što su suše ili nagli porasti količine vode, uzrokuju povremene gubitke vrsta u izvorima. Zbog sve veće učestalosti ekstremnih pojava uzrokovanih klimatskim promjenama bitno je uzeti u obzir takva istraživanja za što kvalitetnije upravljanje i zaštitu vodnih resursa. Von Fumetti i dr. (2006) također ističu da postoje velike razlike u staništima na području mjesta izbijanja vode i vodenoga toka koji se nastavlja. Spomenutu različitost također treba uzeti u obzir za kvalitetno upravljanje izvorima. Izvori su zapravo relativno izolirana staništa gotovo otočnoga karaktera, koja ipak nisu pošteđena čovjekova utjecaja (Nielson i dr., 2019). Na izvorima u kanadskoj Alberti provedeno je istraživanje osjetljivosti flore, odnosno autohtonih i stranih vrsta na izvorima pod utjecajem čovjeka. Pokazalo se da izvori pod jačim utjecajem čovjeka (prvenstveno poljoprivrednih djelatnosti) imaju veći broj i raznolikost stranih vrsta. Sukladno tomu na onim izvorima na koji-

studied coral species growing in close proximity to submarine springs. An interdisciplinary approach is well-suited to the study of submarine springs because of their inherent complexity.

Good examples of applied interdisciplinary approaches to spring research in general are ecological studies of springs. These involve studying the influence of human activities and abiotic factors such as discharge, physicochemical properties of water, geomorphological characteristics, or habitat form on the biological state of a spring. Sinclair (2018) established a link between the diversity of geomorphological forms of springs and biological diversity. He confirmed that the geomorphological diversity of a spring has a positive influence on species diversity therein. Using the typology of Springer and Stevens (2009), he analyzed species richness and the differences in species composition in each type. He also discusses the problem of human influence on springs, specific characteristics of certain spring types, and their great diversity.

Von Fumetti et al. (2006; 2012; 2017) examined the effects of spring discharge variability and spring water temperature variability on macroinvertebrates. In general, more stable conditions require more stable numbers of species and individuals of any given species, while springs with high variability of hydrological and physicochemical conditions result in greater variability in the number of individuals, but also have higher total numbers of species recorded. Extreme conditions during the year, such as droughts or sudden increases in water flow, occasionally cause species loss in springs. Due to the increasing frequency of extreme events caused by climate change, it is important to consider such studies for better management and protection of water resources. Von Fumetti et al. (2006) also pointed out that there is great diversity in habitats in the area of water emergence and persistent flows. This diversity must also be considered in the management of springs. Springs are actually relatively isolated habitats, somewhat similar to islands in character, which are not spared from human impact (Nielson et al., 2019). A study of the sensitivity of flora, i.e. native and alien species, for springs under human influence was conducted in Alberta, Canada. It was found that springs that

ma je čovjekov utjecaj manji ili ga praktički nema, broj je autohtonih vrsta veći. Čovjek dakle čini izvore ranjivijima i podložnijima za naseljavanje stranih vrsta, što može dovesti do pada stabilnosti ekosustava i gubitaka usluga ekosustava (Nielson i dr., 2019).

Vrlo dobar primjer interdisciplinarnoga rada, ali i rada koji također ističe ekološku važnost izvora, jest onaj Freeda i dr. (2019). Autori ističu ulogu izvora u održavanju bioraznolikosti, ali i podupiranju stočarstva u vodama semiaridnih krajeva američke savezne države Oregon. Unatoč svojoj važnosti izvori su na istraživanom području slabo istraženi. Provedena je prostorna analiza na 2519 kartiranih izvora da bi se utvrdila povezanost količine padalina i propusnosti tla s gustoćom izvora te otkrili izvori koji su potencijalno ugroženi klimatskim promjenama. Zatim je provedeno praćenje 137 izvora te su utvrđene poveznice između hidrogeoloških uvjeta, temperature i pH vode te mehanizma izlaska vode na površinu. Utvrđen je i vrlo visok udio izvora koji su pod pritiskom stočarstva. Na deset relativno netaknutih, izoliranih izvora provedena je i analiza biološke raznolikosti te je potvrđena teza o njihovoj važnosti za bioraznolikost navedenoga područja.

Izvorima je potrebno i kvalitetno upravljati, odnosno, prema potrebi ih štititi ili provoditi procese restauracije. Lehosmaa i dr. (2017) provedli su istraživanje učinkovitosti restauracije izvora na području istočne Finske rabeći podatke o zajednicama mahovina i makrobekralješnjaka iz gotovo netaknutih izvora, restauriranih izvora te izvora pod snažnim utjecajem čovjeka. Pokazalo se da su zajednice i u slučaju mahovina i makrobekralješnjaka gotovo iste kod netaknutih i kod restauriranih izvora, dok su značajne razlike u zajednicama između restauriranih izvora i izvora pod snažnim utjecajem čovjeka. Unatoč tomu što su rezultati pokazali učinkovitost restauracije potrebna su detaljnija istraživanja ostalih ekoloških pokazatelja i praćenja restauriranih izvora da bi se ustanovio cijeli utjecaj procesa restauracije. Navedeni rad primjer je relativno jednostavna istraživanja biološkoga sastava izvora čiji su rezultati primjenjivi za buduća (interdisciplinarna) istraživanja i korištenje u upravljanju izvorima.

were subjected to greater human influence (primarily agricultural activities) had a greater amount and diversity of non-native species. Accordingly, springs where human influence is low or virtually absent had a greater number of native species. Thus, humans make springs more vulnerable and susceptible to the non-native species, which can lead to a decline in ecosystem stability and a loss of ecosystem services (Nielson et al., 2019).

A very good example of an interdisciplinary paper that emphasizes the ecological importance of springs, is that of Freed et al. (2019). The authors emphasized the role of springs in maintaining biodiversity, but also in supporting livestock, in the waters of the semi-arid regions of Oregon. Despite their importance, springs in their study area are poorly studied. A spatial analysis of 2,519 mapped springs was conducted to determine the relationship of precipitation and soil permeability with spring density, and to identify springs potentially threatened by climate change. Subsequently, 137 springs were monitored to determine the relationships between hydrogeological conditions, water temperature and pH, and the mechanism(s) by which water reaches the surface. A very high proportion of springs were also found to be under pressure from livestock. A biodiversity analysis was carried out on 10 relatively intact, isolated springs and the thesis on their importance for the biodiversity of their surrounding area was confirmed.

Springs need to be well managed, which means that they may need to be protected or restored in certain cases. Lehosmaa et al. (2017) conducted a study on the effectiveness of spring restoration in eastern Finland using data on moss and macroinvertebrate communities from nearly intact springs, restored springs, and springs under heavy human influence. Communities of both mosses and macroinvertebrates were found to be nearly identical in intact and restored springs, while there were significant differences in communities between restored springs and springs under heavy human influence. Despite the results showing the effectiveness of restoration, more detailed studies of other environmental indicators and monitoring of restored springs are needed to determine the full impact of

Dobar primjer znanstvenoga istraživanja primjenjiva u upravljanju jest ono Siweka i Chełmickog (2004). Oni su u svojem istraživanju primijetili rast količine otopljenih tvari (engl. *Total Dissolved Solids – TDS*) u razdoblju od 1974. do 1999. kod izvora na području Pobrđa Malopolska u južnoj Poljskoj. Istraživanjem lokalnih i regionalnih te antropogenih i prirodnih čimbenika pokušali su odrediti uzrok pogoršanja kvalitete vode. Rezultati su pokazali da lokalni izvori zagađenja mogu značajno utjecati na promjene u kemijskom sastavu podzemne, a time i izvorske vode. Zapravo se kao ključan čimbenik promjene u kvaliteti vode pokazalo kasnije uvođenje kanalizacijskoga sustava u odnosu na uvođenje vodovodne mreže. Zbog uvođenja vodovoda postojeće septičke jame bile su pod jačim opterećenjem, što je u kombinaciji s vrlo propusnom karbonatnom podlogom rezultiralo pogoršanjem kvalitete podzemne i izvorske vode.

Primjer interdisciplinarnoga istraživanja koje obuhvaća gotovo sva najbitnija obilježja izvora – (hidro)geološka, hidrološka, prostorna i ekološka – jest ono Schenka i suradnika (2018). Prilikom istraživanja izvora rijeke Verde u američkoj saveznoj državi Arizoni primijenili su sveobuhvatni, interdisciplinarni pristup, kakav i zagovaraju na ranije spomenutom Institutu za upravljanje izvorima. U svojem tehničkom izvještaju obradili su hidrološka obilježja, kao što su vrijednosti izdašnosti izvora, njihovi trendovi te ukupno bogatstvo prostora vodom. Povezuju fizikalno-kemijska obilježja vode, točnije električnu provodljivost, pH i temperaturu vode s nadmorskom visinom i litološkim obilježjima. Klasificirali su izvore na temelju Springera i Stevensa (2009) te proveli kratku analizu biljnih i životinjskih vrsta čije postojanje ovisi o izvorima (engl. *spring dependent species – SDS*). Naravno da ovakvo istraživanje nije uvijek moguće napraviti niti je ono uvijek potrebno, međutim, ovakav bi pristup trebao biti prisutan prilikom izrada planova za upravljanje izvorima, ali i ostalim vodnim resursima kako bi upravljanje i zaštita izvora bili što kvalitetniji.

the restoration process. The previous work is an example of a relatively simple study of the biological composition of springs, which provided important results for future (interdisciplinary) research and use in spring management.

A good example of scientific research applicable in management is that of Siwek and Chełmicki (2004). In their research, they noticed an increase in total dissolved solids (TDS) in the period from 1974 to 1999 in springs in the Małopolska Uplands area in southern Poland. By studying local and regional anthropogenic and natural factors, they tried to determine the cause of the water quality deterioration. The results showed that local sources of pollution significantly affected the chemical composition of groundwater and, consequently, spring water. In fact, the later introduction of a sewage system, as opposed to the introduction of a water supply system, proved to be a key factor in the change in water quality. The introduction of the water supply system increased the load on existing septic tanks, which, in combination with the highly-permeable carbonate substrate, resulted in the deterioration of groundwater and spring water quality.

An example of interdisciplinary research that includes almost all the important features of springs ((hydro)geological, hydrological, spatial and ecological) is that of Schenk et al. (2018). In their research on the Verde River springs in the state of Arizona, they applied a comprehensive, interdisciplinary approach, as advocated by the Spring Stewardship Institute. In their technical report, they addressed hydrologic characteristics such as spring discharge rates, trends, and overall water abundance in the area. They linked the physico-chemical properties of the water, more specifically the electrical conductivity, pH, and temperature of the water to altitude and lithological features. They classified springs on the basis of Springer and Stevens (2009) and conducted a brief analysis of spring-dependent species. Of course, such an analysis is not always possible, nor is it always necessary, but it is useful in the development of spring management plans, as well as other water resources, in order to manage and protect springs as well as possible.

Istraživanja izvora u Hrvatskoj u 20. stoljeću

Hrvatska je zemlja relativno bogata vodnim resursima (Čanjevac i Orešić, 2020), a izvori imaju značajnu ulogu u vodoopskrbi (Orešić i Čanjevac, 2020). Osim vodoopskrbe izvori se u Hrvatskoj koriste u zdravstvu (toplice) te se sve više i turistički vrednuju (toplice, atraktivni izvori Une, Cetine, Krke i dr.). Oko 50 % površine Hrvatske krški je prostor. Krški izvori u Hrvatskoj vrlo su bogati vodom i čine atraktivne pojave u prostoru, stoga ne čudi da se većina istraživanja bavi upravo njima. *Nekrški* izvori uglavnom su znanstveno manje proučavani, s iznimkom onih koji su izravno zahvaćeni i uključeni u sustav vodoopskrbe.

Istraživanja izvora u Hrvatskoj od početka 20. stoljeća do danas orijentirana su na atraktivne i izdašne pojave krških izvora. Zbog svojega značaja i posebnosti prostor današnjega Nacionalnog parka Plitvička jezera privukao je brojne istraživače: (hidro)geologe, geomorfologe, hidrologe, biologe te hidrokemičare. U sklopu njihovih istraživanja istraživana su obilježja izvora na području parka. Upravo dio tih istraživanja poslužit će kao primjer razvoja istraživanja izvora u Hrvatskoj.

Franić (1910) opisuje morfologiju i neka hidrološka obilježja izvora Crne i Bijele rijeke, potoka Plitvice, ali i ostale izvore na području današnjega nacionalnog parka. Također pretpostavlja i neka hidrogeološka obilježja prostora, odnosno povezanosti opisivanih krških izvora i ponornih zona. Petrik (1958) je prvi mjerio i analizirao hidrološka obilježja na području cijeloga hidrološkog sustava Plitvičkih jezera, uključujući i neke izvore, a na njegova istraživanja nadovezuje se Riđanović (1976) koji spominje da su izvori nedovoljno istraženi te je priložio kartografski prikaz položaja izvora oko Plitvičkih jezera.

Prva mikrobiološka i kemijska istraživanja izvorske vode na području Plitvičkih jezera počela su 1950-ih godina (Vurnek i dr., 2016). Među najvažnijim su istraživanjima ona koja su proveli Emili (1965) te Pavletić i Matoničkin (1967). Emili analizira sanitarne vrijednosti vode izvora Crne rijeke, odnosno provodi bakteriološku analizu, dok Pavletić i Matoničkin analiziraju saprobiološka obiljež-

Spring research in Croatia through 20th century

Croatia is a country relatively rich in water resources (Čanjevac and Orešić, 2020), and springs play an important role in the water supply (Orešić and Čanjevac, 2020). In addition to their role in the water supply, springs in Croatia are used in health care (spas) and are increasingly valued in tourism (spas, Una, Cetina, and Krka springs, etc.). About 50% of the area of Croatia is karst. Karst springs in Croatia are very rich in water and attractive for the region, so it is not surprising that most research is focused on them. Non-karst springs are generally less studied scientifically, except for those that are directly involved in the water supply system.

Research of springs in Croatia from the beginning of the 20th century to the time of writing has been focused on the scenic and water-rich phenomena of karst springs. Additionally, due to its importance and uniqueness, the area of Plitvice Lakes National Park has attracted numerous researchers: (hydro)geologists, geomorphologists, hydrologists, biologists, and hydrochemists. As part of their research, the characteristics of springs in the park area have been studied. Part of this research will serve as an example for the development of spring research in Croatia.

Franić (1910) described the morphology and some hydrological characteristics of the springs of the Crna River and Bijela River, and Plitvice, as well as other springs in the area of the contemporary National Park. He also postulated some hydrogeological features of the area, i.e. the connection of karst springs with ponor zones. Petrik (1958) was the first to measure and analyze hydrological features in the whole hydrological system of Plitvice Lakes, including some springs, and his research was continued by Riđanović (1976), who mentioned that these springs were insufficiently researched. He also included a map of springs of the Plitvice Lakes area.

The first microbiological and chemical studies of spring water in the Plitvice Lakes area began in the 1950s (Vurnek et al., 2016). Two of the most significant papers are Emili (1965) and Pavletić and Matoničkin (1967). Emili analyzed the sanitary values of the water from the spring of the Crna River, i.e. conducted a bacteriological analysis, while Pavletić and Matoničkin analyzed the saprobiological properties of the water from

ja voda izvora Crne i Bijele rijeke te izvora potoka Plitvice.

O utjecaju hidrogeoloških i strukturnih geoloških obilježja na pojavljivanje izvora na području NP Plitvička jezera pisao je Polšak (1974). Kempe i Emeis (1985) analiziraju fizikalno-kemijska obilježja vode Plitvičkih jezera, pa tako i izvora Crne i Bijele rijeke.

Osim istraživanja na Plitvičkim jezerima bitna zabilježena istraživanja izvora kroz 20. stoljeće odvijala su se i u Istri. Veronese (1939 prema Bonacci i Magdalenić, 1993) spominje trasiranja i istraživanja izvora u Istri u svrhu izgradnje vodoopskrbne mreže. Nizovi trasiranja i hidroloških istraživanja, posebno u svrhu iskorištavanja izvora za vodoopskrbu, na području Istre obavljala su se od 1960-ih godina nadalje (Tomašić, 1962 prema Magdalenić i dr., 1995; Gulić, 1973; Magdalenić i dr., 1986; 1987; Oštrić, 2018).

Od važnijih istraživanja krških izvora u ostalim dijelovima Hrvatske možemo istaknuti ona vezana uz izvor Rječine. Božićević opisuje hidrološka obilježja izvora Rječine (Božićević, 1973), kao i geomorfološka obilježja podzemnih kanala kojima voda dolazi do izvora (Božićević, 1974). Biondić i dr. (1979) istražuju hidrogeološka obilježja na slijevima istoga izvora.

Najistaknutije izvore i vrulje južne Hrvatske kartografski prikazuje, a neke i opisuje Riđanović (1974). Svakako treba istaknuti istraživanja na krškim izvorima velikih rijeka. Na rijeci Zrmanji istraživanja 1950-ih godina uključivala su brojna trasiranja ponornih zona na području Gračaca kojima su ustanovljene veze s izvorima Zrmanje (Bonacci, 1999). Hidrološkim obilježjima izvora rijeke Krke bavi se Bonacci (1985), dok obilježja izvora Cetine opisuje Baučić (1967). Mladenović i Uzunović (1962) dali su svoj prilog hidrogeološkim istraživanjem slijeva izvora Omble, koji ima veliku vodoopskrbnu važnost za grad Dubrovnik i okolice. U prethodnom poglavlju spomenuta su istraživanja podmorskih izvora. Na području Hrvatske vrulje se istražuju još od sredine 20. stoljeća (Petrik, 1961; Alfirević, 1969).

the springs of the Bijela and Crna rivers, as well as that of spring of Plitvice Lakes.

Polšak (1974) wrote about the influence of hydrogeological and structural geological features on the occurrence of springs in the area of the Plitvice Lakes National Park. Kempe and Emeis (1985) analyzed the physiochemical characteristics of the waters of the Plitvice Lakes and the springs of Bijela and Crna rivers.

In addition to research on the Plitvice Lakes, there were also significant records of spring exploration in Istria in the 20th century. Veronese (1939, according to Bonacci and Magdalenić, 1993) mentioned the tracing and research of springs in Istria for the purpose of building a water supply network. Since the 1960s, a number of tracing and hydrological investigations have been carried out in Istria, especially for the purpose of exploiting springs as water sources (Tomašić, 1962, after Magdalenić et al., 1995; Gulić, 1973; Magdalenić et al., 1986; 1987; Oštrić, 2018).

Among the most significant researches of karst springs in other parts of Croatia, we can point out those related to the Rječina River spring. Božićević described the hydrological characteristics of the Rječina River spring (Božićević, 1973), as well as the geomorphological characteristics of the underground channels through which water reaches the spring (Božićević, 1974). Biondić et al. (1979) investigated hydrogeological features in the basin of the same spring.

The most important springs and vruljas of southern Croatia were cartographically presented, and (some were) described by Riđanović (1974). Research of the karst springs of the major rivers in Croatia should certainly also be highlighted. During the 1950s, numerous tracing research of ponor zones in the Gračac area were conducted. The results showed a connection between the ponor zones and the Zrmanja River spring (Bonacci, 1999). Bonacci (1985) dealt with the hydrological characteristics of the Krka River spring, while Baučić (1967) described the characteristics of the Cetina River spring. Mladenović and Uzunović (1962) contributed to the hydrogeological research of the catchment area of the Ombla River spring, which is of great importance for the water supply of the city of Dubrovnik and its surroundings. In the previous section, research on submarine springs (vruljas) was mentioned. In the area of Croatia, springs have been explored since the middle of the 20th century (Petrik, 1961; Alfirević, 1969).

Suvremena istraživanja izvora u Hrvatskoj

Suvremena istraživanja od kraja 20. stoljeća i u 21. stoljeću nastavljaju se na dosadašnja istraživanja uz korištenje suvremene tehnologije i metodologije. I dalje su u primarnom fokusu krški izvori iako se javljaju i istraživanja izvora na *nekrškim* dijelovima Hrvatske. Treba napomenuti da se izvori uglavnom istražuju kao jedan segment unutar širega istraživanja. Slijede primjeri nekih suvremenih istraživanja izvora u Hrvatskoj koji su samo reprezentativni dio sveukupnoga istraživačkog rada s tematikom izvora.

Kuhta i dr. (1998) istražuju izvor-špilju Gojak. Ovaj atraktivni krški objekt zapravo je špiljski izvor Gojačke Dobre te je velikim dijelom poplavljen zbog postojanja Hidroelektrane Gojak (Kuhta i dr., 1998). U radu su istraživači usredotočeni na speleološka, odnosno morfološka obilježja špilje. Međutim, njihovo je istraživanje bitno za određivanje podzemnih veza i smjerove otjecanja podzemne vode. Izvori se zapravo vrlo često koriste u istraživanjima podzemnih vodenih tokova, odnosno prilikom trasiranja. Biondić i dr. (2008) i Meaški (2011) donose u svojim radovima pregled trasiranja na području Nacionalnoga parka Plitvička jezera. Većina trasiranja provedena je 70-ih i 80-ih godina prošloga stoljeća. U svojim radovima koriste se rezultatima trasiranja za utvrđivanje hidrogeoloških cjelina, odnosno poriječja na području parka. Navedena trasiranja vezana su za izvore potoka Plitvice, Crne rijeke, Bijele rijeke, ali i ostale izvore na području parka i izvan njega. Osim određivanja njihovih slijevnih područja analiziraju i izdašnosti izvora te kemijska svojstva izvorske vode. Uključuju sve navedene podatke u prijedlog za održivo korištenje i zaštitu vodnih resursa i krških područja na primjeru Plitvičkih jezera.

Određivanje hidrogeološkoga slijeva od velike je važnosti posebno kod onih izvora koji se koriste za vodoopskrbu. Izvor Gradole jedan je od izdašnijih izvora na istarskom poluotoku i jedan od temelja vodoopskrbnoga sustava. Pregled trasiranja na području slijeva izvora Gradole donose Magdalenić i Vazdar (1993). Trasiranja su pokazala izravne veze određenih zona poniranja

Modern spring research in Croatia

Modern research from the end of the 20th century and in the 21st century continues in the previously-described research, with the use of modern technology and methodology. The main focus has been on karst springs, although springs in non-karst areas of Croatia are also being researched. It should be noted that springs are usually researched as a single element within a broader study area. The following are examples of some modern research of springs in Croatia, which are only a representative part of the overall research on the topic of springs.

Kuhta et al. (1998), studied the Gojak spring/cave. This interesting karst object is actually a cave spring of Gojačka Dobra and was largely flooded due to the existence of the Gojak hydroelectric power plant (Kuhta et al., 1998). Researchers have focused on the speleological and morphological features of the cave. However, their research proved essential to determining groundwater connections and groundwater flow directions. In fact, springs are very often used in groundwater flow research, i.e. tracing. Biondić et al. (2008) and Meaški (2011) provided an overview of tracing in the Plitvice Lakes National Park area. Most of the tracing was done in the 1970s and 1980s. In their work, they used the results of tracing to determine hydrogeological units, i.e. catchments in the Park's area. These results refer to the springs of Plitvica, and the Crna and Bijela rivers, but also to other springs in and around the Park. They not only determined their catchment areas, but also analyzed the discharge of the springs and the chemical properties of the water. All these data were incorporated into the proposal for a sustainable use and protection of water resources and karst areas using the example of the Plitvice Lakes.

The determination of hydrogeological basins is particularly important for springs that serve as part of an area's water supply. The Gradole spring is one of the most abundant springs on the Istrian Peninsula and one of the pillars of the water supply system. Magdalenić and Vazdar (1993) gave an overview of tracings in the area to the left of the Gradole spring. The tracings showed direct

i izvora Gradole. S pomoću tih veza određen je hidrogeološki slijev izvora Gradole (Magdalenić i dr., 1995) te su s obzirom na dokazane veze (ali i ostala obilježja prostora) određene zone sanitarne zaštite izvora (Magdalenić i dr., 1995; Mlinarić i dr., 2016). Magdalenić i dr. (1995) ističu osjetljivost, odnosno ranjivost izvora Gradole i njegova slijevnoga područja na kontaminaciju podzemne i izvorske vode, budući da se radi o području vrlo propusnih karbonata. Mlinarić i dr. (2016) proveli su procjenu ranjivosti izvora Gradole metodom SINTACS. Rezultati su pokazali određene podudarnosti, ali i odudaranja ranjivih zona na slijevnom području izvora i zona sanitarne zaštite. U svojem istraživanju predlažu bolje definiranje zona sanitarne zaštite izvora, ali i zagovaraju potrebu za daljnjim hidrogeološkim istraživanjima.

Procjenu ranjivosti radili su i Loborec i dr. (2015) na slijevnom području izvora Jadro i Žrnovnica u okolici Splita. Proveli su analizu rabeći četiri različite, ali često upotrebljavane metode za procjenu ranjivosti podzemnih voda: COP, SINTACS, PI i EPIK. Pokazalo se da korištene metode nisu sasvim primjenjive u krškim, vrlo vodopropusnim područjima. Ipak, pokazalo se da je metoda COP najprimjenjivija za istraživano područje, ali uz dodatak posebnoga faktora K, u ovom slučaju vezana za smjer podzemnoga strujanja vode. Biondić i dr. (2014) na slijevnom području izvora Novljanska Žrnovnica došli su do sličnih zaključaka. Iskoristili su istraživano područje za testiranje gotovo istih metoda za procjenu ranjivosti kao i Loborec i dr. (2015): COP, SINTACS, PI i COST 620. Zbog njihove manjkavosti u primjeni na krškim područjima autori su razvili vlastiti model za procjenu ranjivosti, specijaliziran za krška područja – KAVA. Iako su ta istraživanja služila prvenstveno za testiranje i razvoj metoda procjene ranjivosti izvora, rezultirala su i kartama ranjivosti istraživanih slijevnih područja izvora. Dobivene karte mogu se koristiti za bolje definiranje zona zaštite izvora kao i za kvalitetno prostorno planiranje.

Najbrojnija istraživanja krških izvora u Hrvatskoj odnose se na njihova hidrološka obilježja. Brojni znanstveni i stručni radovi analizi-

connections between certain ponor zones and the Gradole spring. Based on these connections, the hydrogeological basin of the Gradole spring was determined (Magdalenić et al., 1995), and taking into account the proven connections (but also other features of the area), sanitary protection zones were established (Magdalenić et al., 1995; Mlinarić et al., 2016). Magdalenić et al. (1995) pointed out the sensitivity, i.e. susceptibility, of the Gradole spring and its catchment area to groundwater and spring water contamination, as it is an area with highly-permeable carbonates. Mlinarić et al. (2016) conducted a vulnerability assessment of the Gradole spring using the SINTACS method. The results showed certain similarities, but also discrepancies of the vulnerable zones in the catchment area of the spring and the sanitary protection zones. In their study, they proposed a better definition of the sanitary protection zones of springs, but also advocated the need for further hydrogeological research.

A vulnerability assessment was also carried out by Loborec et al. (2015) in the catchment areas of the Jadro and Žrnovnica springs near Split. They performed the analysis using four different, but commonly-used, methods for groundwater vulnerability assessment: COP, SINTACS, PI, and EPIK. It was found that the methods used were not entirely applicable in highly-permeable karst areas. Nevertheless, the COP method proved to be the most suitable for the study area, but with the addition of a special factor “K”, which refers to the direction of groundwater flow. Biondić et al. (2014) obtained similar results in the catchment area of the Novljanska Žrnovnica spring. They used the study area to test similar vulnerability assessment methods to Loborec et al. (2015): COP, SINTACS, PI, and COST 620. Due to their shortcomings when applied in karst areas, the authors developed their own specialized vulnerability assessment model: KAVA. Although these studies were primarily intended to test and develop methods for estimating the vulnerability of springs, they also resulted in vulnerability maps of the spring catchments they studied. These maps can be used for better definition of spring protection zones as well as for high-quality spatial planning.

raju hidrološka obilježja krških izvora: Gradole (Bonacci, 1996; Rubinić i dr., 2015), izvor rijeke Une (Bonacci, 2018), izvor Rječine (Bonacci i dr., 2017), izvori potoka Rumina (Bonacci i dr., 2016; Denić-Jukić i dr., 2020) te rijeke Like i rijeke Gacke (Bonacci i Andrić, 2008; Fišić i dr., 2019). Uglavnom se u navedenim istraživanjima radi o analiziranju hidroloških obilježja, odnosno karakterističnih vrijednosti mjesečnih i godišnjih izdašnosti (protoka), analiziranju elemenata vodne bilance poput ovisnosti izdašnosti o padalinama, analiziranju temperature izvorske vode te izradi i analizi hidrograma. Hidrološka istraživanja imaju veliku važnost za hidrogeološka istraživanja krških područja, odnosno krških vodonosnika (Bonacci, 1993; 2001), ali čine i podlogu za interdisciplinarna istraživanja (Bonacci i dr., 2017). Na primjeru izvora Velikog i Malog Rumina (Bonacci i dr., 2016) analiziran je antropogeni utjecaj na promjenu hidroloških obilježja krških izvora. U ovom slučaju radi se o smanjenju izdašnosti, odnosno pada vrijednosti niskih, srednjih i maksimalnih izdašnosti (protoka) uslijed ljudskih intervencija na slijevnom području izvora.

Osim izravnih antropogenih utjecaja krški su izvori pod utjecajem klimatskih promjena. Zbog toga su bitna istraživanja kao što je ono Rubinića i dr. (2015). Njihov rad bavi se analizom hidrološke suše na području Istre u 2012. godini, odnosno njezinu utjecaju na hidrološka obilježja izvora Bulaž, Sv. Ivan i Gradole. Zbog ekstremnih uvjeta krški izvori uključeni u vodoopskrbni sustav u poriječju Mirne imali su izrazito smanjenu izdašnost, što je dovelo do posebnih mjera redukcije vode na području Istarske županije. Rezultati istraživanja pokazali su višestruko niže izdašnosti pojedinih izvora od prethodno procijenjenih. Autori zaključuju da takvi podaci upućuju na potrebu za daljnjim radom na optimizaciji korištenja raspoloživoga vodnog potencijala u poriječju Mirne, ali i za istraživanjima na drugim sličnim područjima u kojima je opasnost od utjecaja hidrološke suše na vodoopskrbu značajna.

Na području Istre istraživani su i izvor Rakonek, koji je uključen u vodoopskrbni sustav Vodovoda Pula. Izvor je podzemnim tokovima

Most studies of karst springs in Croatia deal with hydrological characteristics. Numerous scientific and professional works have analyzed the hydrological characteristics of karst springs: Gradole (Bonacci, 1996; Rubinić et al., 2015), the spring of the Una River (Bonacci, 2018), the spring of the Rječina River (Bonacci et al., 2017), and the springs of the Rumin (Bonacci et al., 2016; Denić-Jukić et al., 2020), Lika, and Gacka rivers (Bonacci and Andrić, 2008; Fišić et al., 2019). These studies have mainly been concerned with the analysis of hydrological characteristics, i.e. characteristic values of monthly and annual discharge, analysis of elements of water balance such as dependence of discharge on precipitation, analysis of spring water temperature, and preparation and analysis of hydrograms. Hydrological research is of great importance for the hydrogeological research of karst areas, i.e. karst aquifers (Bonacci, 1993; 2001), and it is also the basis for interdisciplinary research (Bonacci et al., 2017). The example of Veliki and Mali Rumin springs (Bonacci et al., 2016) was used to analyze anthropogenic influence on the change of hydrological characteristics of karst springs. In this case, the issue was the decrease in the values of low, average, and maximum discharge due to human intervention in the catchment area of the springs.

In addition to direct anthropogenic impacts, karst springs are also affected by climate change. Therefore, research such as that of Rubinić et al. (2015) is important. Their work dealt with the analysis of the drought in Istria in 2012 and its impact on the hydrological characteristics of the Bulaž, St. Ivan, and Gradole springs. Due to the extreme conditions, the karst springs included in the water supply system in the Mirna River basin had significantly lower discharge, which led to special water use measures in Istria County. The results of the study showed that the discharges of individual springs were several times lower than previously assumed. The authors concluded that these data indicate the need for further work to optimize the use of available water in the Mirna River basin, and also to the need for studies in similar areas where the risk of drought is significant.

In the region of Istria, the Rakonek spring has also been researched, which is part of Pula's wa-

povezan s poriječjem rijeke Pazinčice i prilikom bujičnih epizoda na poriječju Pazinčice na njemu se pojavljuje zamućenje. Istraživanjem je dobiven model predviđanja pojave zamućenja na izvoru, što je od velike koristi za optimalno upravljanje izvorom (Radišić i dr., 2020). Parlov i dr. (2007) istraživali su hidrogeološka obilježja vodonosnika već spomenutog izvora Bulaž analizom recesijske krivulje hidrograma otjecanja. Dobiveni rezultati istraživanja smatraju se pouzdanim i vrlo točnim za praktične svrhe u vodoopskrbi.

Osim hidroloških i hidrogeoloških istraživanja krških izvora prisutna su i ona biološka. Najzastupljenija su istraživanja zajednica vodengrinja u većim krškim izvorima Gorske Hrvatske i Dalmacije (Pozojević i dr., 2018a; 2018b; 2019; 2020). U radovima su identificirane nove vrste vodengrinja, određeno bogatstvo vrsta i gustoća populacija u odabranim izvorima te su praćeni okolišni čimbenici koji na njih utječu. Bitno je istaknuti da se u navedenim istraživanjima uspoređuju razlike u zajednicama između limnokrenih i reokrenih krških izvora (Pozojević i dr., 2018a; 2020).

Osim istraživanja makrobekralješnjaka rado- vi analiziraju mikrobiološku ispravnost izvorske vode, odnosno njezinu kvalitetu i pitkost (Crnković i Gobin, 2013). Na području Gorskoga kotara analizirana je kvaliteta vode za piće izvora Skrad 1, izvora rijeke Dobre i izvora Srednji jarak. Pokazalo se da su mikrobiološka obilježja istraživanih krških izvora osjetljiva na meteorološke uvjete, odnosno padaline, ali i na antropogeni utjecaj, odnosno blizinu naseljenih područja. Autori zaključuju da će na krškim, dobro propusnim područjima budućnost izvorskih voda ovisiti o brizi lokalnoga stanovništva te izgradnji kvalitetnoga kanalizacijskog sustava (Crnković i Gobin, 2013).

Vrlo važan rad za istraživanje izvora u Hrvatskoj bavi se inventarizacijom te osnovnim hidrološkim i fizikalno-kemijskim obilježjima vode izvora na području Parka prirode Žumberak – Samoborsko gorje (Vujnović, 2011). To je jedan od rijetkih radova koji uključuje inventarizaciju izvora te čiji su predmet istraživanja gotovo svi izvori na istraživanom području, njih više od 800.

ter supply system. The spring is connected to the catchment area of the Pazinčica River by underground flows, and during torrential episodes in the catchment area of the Pazinčica River the spring becomes turbid. The research generated a model for predicting turbidity, which is very useful for optimal spring management (Radišić et al., 2020). Parlov et al. (2007) studied the hydrogeological characteristics of the aquifer of the Bulaž spring by analyzing the recession curve of the discharge hydrograph. The results of this research are considered reliable and very accurate for practical purposes.

In addition to the hydrological and hydrogeological research of karst springs, there are also biological studies. Most frequently, communities of water mites in the larger karst springs of Mountainous Croatia and Dalmatia have been studied (Pozojević et al., 2018a; 2018b; 2019; 2020). These works have identified new water mite species, determined species richness and population density in selected springs, and monitored environmental factors affecting them. It is important to note that the aforementioned studies compared differences in communities between limnocene and rheocene karst springs (Pozojević et al., 2018a; 2020).

In addition to macroinvertebrate research, some biological studies have also analyzed the microbiological safety of spring waters, i.e. their quality and potability (Crnković and Gobin, 2013). In Gorski Kotar, the quality of drinking water from the Skrad I spring, the Dobra River spring and the Srednji Jarak spring was analyzed. It was shown that the microbiological characteristics of karst springs are sensitive to meteorological conditions, i.e. precipitation, and also to anthropogenic impact, i.e. proximity to populated areas. The authors concluded that in well-drained karst areas, the future of spring water depends on the local population and the construction of high-quality wastewater systems (Crnković and Gobin, 2013).

A very important work for spring research in Croatia deals with the inventory and basic hydrological and physicochemical characteristics of spring water in the area of Žumberak - Samoborsko Gorje Nature Park (Vujnović, 2011). This is one of the few works that includes an inventory of almost all springs in the study area: more than 800

Analizirana je raspodjela izvora prema litostratigrafskim jedinicama i nadmorskoj visini te je prikazana raspodjela izdašnosti izvora i njihovih osnovnih fizikalno-kemijskih parametara. Ovakav tip istraživanja izvora pruža osnovne podatke o obilježjima izvora na istraživanom području, ali je i odlična osnova za buduća hidrološka, hidrogeološka te ostala istraživanja izvora i vodnih resursa.

Sličan studentski rad, dobitnika Rektorove nagrade, bavi se inventarizacijom hidroloških objekata na jugozapadnim obroncima Medvednice (Brletić, 2017). Hidrološkim objektima pripadaju i izvori. U navedenom radu oni su terenski inventarizirani, njihove geografske koordinate unesene su u GIS bazu podataka te su im pridružena fizikalno-kemijska obilježja vode, mjerena *in situ*. Izvorima na jugoistočnim obroncima Medvednice bave se Lovrić i dr. (2017). Na temelju hidrogeoloških obilježja procjenjuju vrijednost zaliha pitke vode te istražuju kaptirane izvore i zdence koji se koriste ili su se koristili u vodoopskrbi. Analizirali su kemijski sastav vode te kemijska obilježja u svrhu procjene pitkosti vode. Smatraju da je potrebno održavati kaptirane izvore i zdence kako bi voda bila upotrebljiva te da je nužna zaštita slijevnih područja izvora. Naglašavaju da osim iskorištenih vodnih resursa istraživani prostor ima još dodatnih neiskorištenih izvora koji bi mogli biti kaptirani. Kvalitetu izvorske vode na Medvednici analizirali su Dekić i Hrenović (2017). Proveli su bakteriološku analizu odabranih izvora uz planinarske staze. Pokazali su kako nisu svi istraživani izvori u trenutku uzorkovanja bili prikladni za piće. Zaključuju da je potrebno voditi sustavno praćenje kvalitete vode na izvorima. Meaški i dr. (2019) donose pregled osnovnih obilježja krških izvora Varaždinske županije uključenih u vodoopskrbni sustav. Analiziraju hidrogeološka obilježja prostora, odnosno vodonosnika izvora, vrijeme zadržavanja vode u podzemlju, vrijednosti izdašnosti izvora te razlike u oscilacijama njihove izdašnosti. Zaključuju da su potrebna dodatna istraživanja hidrogeoloških slijevnih područja izvora te sukladno njima korekcije zona sanitarne zaštite izvora.

of them. The distribution of springs by lithostratigraphic unit and altitude was analyzed, as well as the distribution of spring discharge and basic physiochemical parameters. This type of spring research provides basic data on the characteristics of springs in the study area, and also provides a basis for future hydrological, hydrogeological and other studies of springs and water resources.

A similar paper, which won the Rector's Award of the University of Zagreb, deals with the inventory of hydrological facilities (including springs) on the southwestern slopes of Medvednica Mountain (Brletić, 2017). In this paper, the springs were inventoried *in situ*, their geographical coordinates were entered into a GIS database, and they were associated with the physiochemical properties of water measured *in situ*. The springs on the southeastern slopes of Medvednica Mountain were addressed by Lovrić et al. (2017). Based on hydrogeological characteristics, they assessed the value of the drinking water supply and studied captured springs and wells used for water supply. They analyzed the chemical composition of the water and chemical properties, in order to assess its potability. The authors stated that it was necessary to maintain captured springs and wells to keep water usable, and protect the catchments of springs. They emphasized that there were other untapped springs in the study area that could be developed in addition to the water resources already in use. The quality of Medvednica spring water was analyzed by Dekić and Hrenović (2017). They conducted a bacteriological analysis of selected springs along mountain paths. They showed that not all studied springs were suitable for drinking water at the time of sampling. They concluded that systematic monitoring of spring water quality is necessary. Meaški et al. (2019) provided an overview of the basic characteristics of karst springs that are part of the water supply system in Varaždin County. They analyzed the hydrogeological characteristics of the area, i.e. the aquifer of the springs, how long water was retained in the ground, the values of the discharge of the springs, and variations in their discharge values. They concluded that additional research on the hydrogeological catchments was needed, which would allow for the protection and preservation of springs in the area.

Zaključak

Izvori vode su zbog svoje važnosti i povezivanja hidrosfere, litosfere, biosfere i atmosfere dugo predmet proučavanja raznih struka te iz različitih perspektiva. Rezultat su toga mnogobrojne klasifikacije koje se i danas razvijaju i povezuju. U radu su predstavljene važnije klasifikacije izvora. Temeljne klasifikacije nastale su početkom dvadesetoga stoljeća te su kasnije nadograđivane i razvijane. U posljednjih dvadesetak godina javlja se potreba i želja znanstvenika za interdisciplinarnim istraživanjima i klasifikacijama izvora, međutim još ne postoji međunarodno prihvaćena interdisciplinarna klasifikacija ni baza podataka izvora koja bi omogućila uspoređivanje istraživanja izvora i korištenje podataka različitih istraživanja.

Predstavljani su primjeri suvremenih istraživanja izvora, čiji se rezultati potencijalno mogu koristiti prilikom razvijanja njihovih klasifikacija. Iako raste broj interdisciplinarnih istraživanja izvora i potreba za njima, i dalje su vrlo zastupljena istraživanja njihovih općih obilježja. Razlog je tomu njihova brojnost, nedostatak osnovnih informacija o izvorima, njihova raznolikost te relativna zanemarenost u istraživanjima u prošlom stoljeću u odnosu na ostale pojave vode.

Unatoč svojoj važnosti izvori su često izostavljeni iz službenih dokumenata koji se bave upravljanjem vodnim resursima. Uglavnom se pridružuju površinskim ili podzemnim vodnim tijelima, a zapravo bi trebali biti zasebna kategorija zbog svoje jedinstvene prirode. To ne znači da izvore treba upravljački odvajati od ostatka hidroloških cjelina, nego se naglašava potreba za definiranjem posebnih smjernica i pristupa izvorima da bi se njima što kvalitetnije upravljalo s obzirom na to da tvore jedinstvena staništa i predstavljaju jedinstvene vodne pojave.

Predstavljen je i prvi pregled istraživanja izvora u Hrvatskoj. Kroz primjere je opisan razvoj istraživanja izvora kroz 20. stoljeće te su opisane vrste najvažnijih suvremenih istraživanja. U Hrvatskoj se većinom istražuju krški izvori, dok su nekrški izvori slabije istraženi. Prevladavaju istraživanja za potrebe vodoopskrbe i određivanja zona sanitarne zaštite izvora uključenih u vodoopskrbni sustav. Radovi

Conclusion

Because of their importance and their role as a link between the hydrosphere, lithosphere, biosphere, and atmosphere, springs have long been studied by researchers from various fields, and from different perspectives. This has led to numerous classifications that are interrelated and still evolving. The paper presents a significant classifications of springs. The basic classifications date to the early 20th century and have continued to develop. In the last twenty years, the need for interdisciplinary research and classification of springs has emerged. However, there is no internationally-recognized interdisciplinary classification method or database of springs that would allow for comparison of research and facilitate the use of data from various surveys.

Examples of modern research springs have been presented in this paper, and their results could be used to develop spring classifications. Although the number of (and demand for) interdisciplinary studies on springs is increasing, research on their general characteristics is still very common. The reason for this is the number and variety of springs, lack of basic information about springs, and that springs have been somewhat neglected in research in comparison to other waters/bodies of water.

Despite their importance, springs are not usually mentioned in official documents dealing with water resource management. They are often combined with groundwater or surface water bodies, but they should have a category of their own because they are unique. This does not mean that springs should be separated from other hydrological units, but there should be specific guidelines for springs in order to manage them as well as possible, as they have unique characteristics and form unique habitats.

The paper also contains the first overview of spring research in Croatia. The development of Croatian spring research in the 20th century is described through examples, and the types of the most significant modern research are described. In Croatia, research of springs has focused mostly on karst springs, while non-karst springs are relatively poorly researched. Studies regarding the needs of water supply and determination of sanitary protection zones of springs included in the water supply system

**Pregled klasifikacija
i suvremenih
istraživanja izvora u
svijetu i Hrvatskoj**

*An overview of
classifications and
modern research of
springs in the world
and in Croatia*

koji se bave izvorima u pravilu ne uključuju njihovu klasifikaciju. Jedan je od uzroka tomu što se velika većina radova bavi velikim krškim izvorima, čiji se tip tek navede. Krški izvori često su dio većih istraživanja i služe za određivanje hidrogeoloških obilježja na određenim krškim područjima. Razlog slabije istraženosti *nekrških* izvora velikim je dijelom taj što su ti izvori, pojedinačno gledano, relativno male izdašnosti, manje su vizualno atraktivni, a zbog velike brojnosti i nedostupnosti zahtijevaju mnogo terenskoga rada. Unatoč tomu nekrški izvori u Hrvatskoj zaslužuju detaljnije istraživanje jer su odraz hidroloških, hidrogeoloških i ekoloških procesa te kumulativno čine vrlo bitne vodne resurse.

predominate. Works dealing with springs generally do not include classifications. One of the reasons for this is that the vast majority of papers deal with large karst springs, and their type is stated but not examined further. Karst springs are often part of broader research and are used to determine hydrogeological features in karst areas. The reason for the relatively poor exploration of non-karst springs is mainly due to the fact that these springs have relatively low discharge, are less scenic, and require a lot of field work due to their abundance and low accessibility. Nevertheless, non-karst springs in Croatia deserve more detailed attention, as they reflect hydrological, hydrogeological, and ecological processes and together represent a very significant water resource.

Literatura References

- Agarwal, A., Bhatnaga, N. K., Nema, R. K., Agrawal, Nitin K., 2012: Rainfall Dependence of Springs in the Midwestern Himalayan Hills of Uttarakhand, *Mountain Research and Development* 32 (4), 446-455.
- Alfaro, C., Wallace, M., 1994: Origin and classification of springs and historical review with current applications, *Environmental Geology* 24, 112-124.
- Alfirevic, S., 1969: Jadranske vrulje u vodnom režimu Dinarskog krša i njihova problematika. *Krš Jugoslavije* 6, Zagreb.
- Antić, A., Tomić, N., Marković, S., 2019: Karst geoheritage and geotourism potential in the Pek River lower basin (eastern Serbia), *Geographica Pannonica* 23 (1), 32-46, <https://doi.org/10.5937/gp23-20463>.
- Arago, M., 1835: On springs, artesian wells, and sprouting fountains, *The Edinburgh New Philosophical Journal* 18, 205-246.
- Ayoub, G., Khoury, R., Ghannam, J., Acra, A., Hamdar, B. 2002: Exploitation of submarine springs in Lebanon: assessment of potential, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 51 (1), 47-64. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2002.0005>.
- Baučić, I., 1967: Cetina – razvoj reljefa i cirkulacija vode u kršu. *Acta Geographica Croatia* 6 (1), 5-167.
- Benac, Č., Rubinić, J., Ožanić, N., 2003: The origine and evolution of coastal and submarine springs in Bakar Bay. *Acta Carsologica* 32 (1), 157-171.
- Bikse J., Gavinolla, M. R., 2021: Water Springs as a Resource for Nature Tourism in Latvia: a Tourist Perspective, In: *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*, Volume 1.
- Biondić, B., Goatti, V., Vulić, Z., 1979: Hydrogeological investigation of watershed Rjecina spring, Grobnicko polje, Zvir and Martinscica, *Proceedings of the 1st International Symposium about Groundwater*, UNDP, 61-69, Zagreb.
- Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B., 2014: Vulnerability mapping of Novljanska Žrnovnica karstic spring catchment area (Croatia), in: Kukurč, N., Stevanović, Z., Krešić, N. (eds.): *Proceedings of International Conference and Field Seminar „Karst Without Boundaries“*, 357-363.
- Biondić, B., Zojer, H., Biondić, R., Yehdego, B., Kapelj, S., Meaški, H., Zwiker, G., 2008: *Održivo korištenje i zaštita vodnih resursa na području Plitvičkih jezera – Završno izvješće*, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 129.
- Birk, S., Hergarten, S., 2012: Estimation of aquifer parameters from the recession of spring hydrographs – Influence of flow geometry, *Geophysical Research Abstracts* 14, EGU General Assembly 2012.
- Bonacci, O., 1985: Hydrological investigations of Dinaric Karst at the Krčić catchment and the river Krka springs (Yugoslavia), *Journal of Hydrology* 82, 317-326.
- Bonacci, O., 1993: Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers, *Hydrological Sciences Journal* 38 (1), 51-62, DOI: 10.1080/02626669309492639.
- Bonacci, O., 1996: Hydrology of the Gradole Karst Spring (Istria-Croatia)/ Hidrologija kraškoga izvira Gradole (Istra-Hrvaška), *Acta Karstologica* XX, 45-55.
- Bonacci, O., 1999: Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja, *Hydrological Sciences Journal* 44 (3), 373-386, DOI: 10.1080/02626669909492233.
- Bonacci, O., 2001: Analysis of the maximum discharge of karst springs, *Hydrogeology Journal* 9, 328-338, <https://doi.org/10.1007/s100400100142>.
- Bonacci, O., 2018: Prilog hidrologiji krškog izvora vrelo Une, *Hrvatske vode* 26, 119-128.
- Bonacci, O., Andrić, I., 2008: Sinking karst rivers hydrology: case of the Lika and Gacka (Croatia), *Acta Carsologica* 37 (2), 185-196.
- Bonacci, O., Bojanić, D., 1991: Rhythmic karst springs, *Hydrological Sciences Journal* 36 (1), 35-47, DOI: 10.1080/02626669109492483.
- Bonacci, O., Buzjak, N., Roje-Bonaccini, T. 2016: Changes in hydrological regime caused by human in-

- tervention in karst: the case of the Rumin Springs, *Hydrological Sciences Journal* 61 (13), 2387-2398, DOI: 10.1080/02626667.2015.1111518.
- Bonacci, O., Magdalenić, A., 1993: The Catchment Area of the Sv. Ivan Karst Spring in Istria (Croatia), *Groundwater* 31, 767-773, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00849.x>.
- Bonacci, O., Oštrić, M., Roje-Bonacci, T., 2017: Prilog hidrologiji krškog izvora Rječine, *Hrvatske vode* 25, 99-108.
- Borneuf, D., 1983: *Springs of Alberta* 82-3, Alberta Research Council Earth Sciences Report, Edmonton, Canada
- Božičević, S., 1973: Contribution to the hydrogeology of the Rječina spring, *Geološki vjesnik* 25, 277-283.
- Božičević, S., 1974: Morphology of the Rječina spring water channels, *Geološki vjesnik* 27, 273-281.
- Brletić, F., 2017: *Hidrološki objekti na jugozapadnim obroncima Medvednice*, rad za Rektorovu nagradu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Bryan, K., 1919: Classification of Springs, *Journal of Geology* 27 (7), 522-561.
- Bornhauser, K., 1913: Der Tierwelt der Quellen in der Umgebung Basels Hydrobiologie. *Internationale Revue der gesamten hydrobiologie. Biologische Supplement* 5, 1-90.
- Buczyński S., Rzonca B., 2018: Influence of geologic structure on the presence, discharge and physical and chemical properties of springs in the Muszynka catchment (Carpathian flysch), *Episodes* 48, 89-96, <https://doi.org/10.18814/epiugs/2018/018012>.
- Buzjak, N., Kovač-Konrad, P., Jalžić, V., 2013: Novija istraživanja vrulja Zečica i Modrić (sjeverna Dalmacija), *Knjiga sažetaka, 3. znanstveni skup Geologija kvartara u Hrvatskoj*.
- Cantonati, M., Stevens, L. E., Sagadelli, S., Springer, A. E., Goldscheider, N., Celico, F., Filippini, M., Ogata, K., Gargini, A., 2020: Ecohydrogeology: The interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota and ecosystems, *Ecological indicators* 110, 1-15.
- Cantonati, M., Fensham, R. J., Stevens, L. E., Gerecke, R., Glazier, D. S., Goldscheider, N., Knight, R. L., Richardson, J. S., Springer, A. E. and Tockner, K., 2021: Urgent plea for global protection of springs. *Conservation Biology* 35, 378-382, DOI: 10.1111/cobi.13576.
- Cervi, F., Marcaccio, M., Petronici, F., Borgatti, L., 2014: Hydrogeological characterization of peculiar Apenninic springs. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 364, 333-338. DOI:10.5194/piahs-364-333-2014.
- Clarke, F. W., 1924: *The data of geochemistry*, Government Printing Office, Washington, D.C. USGS, 181-217.
- Cocito, S., Novosel, M., Pasarić, Z., Key, M., 2006: Growth of the bryozoan *Pentapora fascialis* (Cheilostomata, Ascopora) around submarine freshwater springs in the Adriatic Sea, *Linzer biologische Beitrage* 38 (1), 15-24.
- Corsini, A., Cervi, F., Ronchetti, F., 2009: Weight evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy), *Geomorphology* 111, 79-87.
- Crnković, G., Gobin, I., 2013: Mikrobiološka ispravnost prirodne izvorske vode u odabranim izvorima na području Gorskog kotara, *Hrvatske vode: časopis za vodno gospodarstvo* 21 (83), 17-24.
- Čanjec, I., Orešić, D., 2020: Surface Water Resources and Their Management in Croatia, in: Negm, A., Romanescu, G., Zelenáková, M. (eds.): *Water Resources Management in Balkan Countries*. Heidelberg, Springer International Publishing, 159-174.
- Dekić, S., Hrenović, J., 2017: Bakteriološka analiza izvorske vode uz najpoznatija izletišta Parka prirode Medvednica, *Hrvatske vode* 25, 13-16.
- Denić-Jukić, V., Lozić, A., Jukić, D., 2020: An Application of Correlation and Spectral Analysis in Hydrological Study of Neighboring Karst Springs, *Water* 12, 3570. <https://doi.org/10.3390/w12123570>.
- Dietrich, W. E., Dunne, T., 1993: The channel Head, u: Beven, K., i Kirkby, M. J. (ur): *Channel network hydrology*, Chinchester, Wiley, 175-219.
- DiNapoli, R. J.; Lipo, C. P.; de Smet, T. S.; Hunt, T. L., 2021: Thermal Imaging Shows Submarine Groundwater Discharge Plumes Associated with Ancient Settlements on Rapa Nui (Easter Island, Chile), *Remote Sensing* 13, 2531, <https://doi.org/10.3390/rs13132531>.
- Dukić, D., 1984: *Hidrologija Kopna*, Naučna knjiga, Beograd.
- Dunne, T., 1980: Formation and controls of channel networks, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 4 (2), 211-239.
- Emili, H., 1965: Prilog upoznavanju sanitarne vrijednosti izvora i vodotoka u Nacionalnom parku Plitvička Jezera, *Plitvički bilten* 1 (1), 39-51.
- Fetter, C. W., 1980: *Applied hydrogeology*, C. E. Merrill.
- Fiffy, H. S., Elia, G., Nor Hizami, H., Zulfazman, H., Nordiana, M., Nor Akmar, A., 2021: Evaluation on the Potential of Hot Spring as Nature Tourism Attraction in Lojing Highlands, Kelantan, Peninsula Malaysia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Fišić, M., Rubinić, J., Radišić, M., 2018: Hidrološka analiza izvorišnog dijela rijeke Gacke, *Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci) XXI* (1), 163-177, <https://doi.org/10.32762/zr.21.1.10>.
- Fiorillo, F. 2014: The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers. *Water Resources Management* 28, 1781-1805, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0597-z>.
- Franić, D., 1910: *Plitvička jezera i njihova okolica*, Javna ustanova Nacionalni park Plitvička jezera, 2019.
- Freed, Z., Aldous, A., Gannett, M. W., 2019: Landscape controls on the distribution and ecohydrology of central Oregon springs, *Ecohydrology* 16, 12:e2065, <https://doi.org/10.1002/eco.2065>.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979: *Groundwater*, Engteewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall.
- Fritz, F., Bahun, S., 1997: The morphogenesis of submarine springs in the Bay of Kaštela, Croatia, *Geologia Croatica* 50 (1), 105-110.
- Gavrilović, D., 1967: Intermitentni izvori u Jugoslaviji (Intermittent springs in Yugoslavia), *Glasnik Srpskog geografskog društva* 47 (1), 13-36.

- Gavrilović, D., 1970: Intermittierende Quellen in Jugoslawien, *Die Erde* 101 (4).
- Gerecke, R. and Di Sabatino, A., 1996: Water mites (Acari, Hydrachnellae) and spring typology in Sicily, *Crunoecia* 5, 34-41.
- Giapopetti, M., Materazzi, M., Pambianchi, G., Posavec, K., 2017: Analysis of mountain springs discharge time series in the Tennacola stream catchment (central Apennine, Italy). *Environmental Earth Sciences* 76, 20, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6339-1>.
- Gianfaldoni, S., Tchernev, G., Wollina, U., Rocca, M. G., Fioranelli, M., Gianfaldoni, R., Lotti, T., 2017: History of the Baths and Thermal Medicine. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences* 5 (4), 566-568, <https://doi.org/10.3889/oamjms.2017.126>.
- Glazier, D. S., 2014: Springs, in: Elias, S. A. (eds.): *Reference module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, Waltham, MA, 78.
- Gulić, I., 1973: Izvor Gradole – krški fenomen u dolini rijeke Mirne, *Građevinar* 5, 152-161.
- Himmel, J., 1964: Estavela-hidrografický krasový jev, *Kras v Cechovsku* 1, Brno.
- Horvat, B.; Rubinić, J., 2021: Evaluating the Applicability of Thermal Infrared Remote Sensing in Estimating Water Potential of the Karst Aquifer: A Case Study in North Adriatic, Croatia, *Remote Sensing* 13, 3737, <https://doi.org/10.3390/rs13183737>.
- Kempe, S., Emeis, K., 1985: Carbonate chemistry and the formation of Plitvice Lakes, in: Degens, E. T., Kempe, S., Herrera, R. (eds.), *Transport of carbon and minerals in major world rivers*. Mitteilungen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Hamburg, SCOPE/UNEP Sonderbd, 351-583.
- Kovács, A., Perrochet, P., 2008: A quantitative approach to spring hydrograph decomposition, *Journal of Hydrology* 352 (1-2), 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.009>.
- Krešić, N., 2010: Types and classifications of Springs, in: Krešić, N., Stevanović, Z. (eds.): *Groundwater Hydrology of Springs*, Elsevier, 31-86.
- Kuhta, M., Jalžić, B., Novosel, A., 1999: Izvor špilja Gojak, *Speleolog* 46-47 (1), 3-12.
- Lehosmaa, K., Jyväsjärvi, J., Virtanen, R., Rossi, P. M., Rados, D., Chuzhekova, T., Markkola, A., Ilmonen, J., Muotka, T., 2017: Does habitat restoration enhance spring biodiversity and ecosystem functions?, *Hydrobiologia* 793, 161-173, DOI: 10.1007/s10750-016-2760-4.
- Loborec, J., Kapelj, S., Dogančić, D., Siročić, A. P., 2015: Assessment of Groundwater Vulnerability in Croatian Karstic Aquifer in Jadro and Žrnovnica Springs Catchment Area, in: Andreo B., Carrasco F., Durán J., Jiménez P., LaMoreaux J. (eds.): *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*, Environmental Earth Sciences 1. Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3_45.
- Lovrić, F., Kapelj, S., Loborec, J., 2017: Procjena zaliha pitke vode temeljem hidrogeoloških obilježja na području sjeveroistočnog Prigorja, *Inženjerstvo okoliša* 4 (1), 25-39.
- Magdalenic, A., Bonacci, O., Jurak, V., 1987: Sliv izvora Bulaž u središnjoj Istri, *Krš Jugoslavije* 12 (1), 1-26, Zagreb.
- Magdalenic, A., Jurak, V., Bonacci, O., 1986: Analysis of Karst Spring, Yugoslavia. *International Symposium on Karst Water Resources*, IAHS Publications, 161, 359-269.
- Magdalenic, A., Vazdar, T. 1993: Hidrogeološka interpretacija trasiranja podzemnih voda u središnjoj Istri, *Hrvatske vode* 1 (4), 231-238.
- Magdalenic, A., Vazdar, T., Hlevnjak, B., 1995: Hydrogeology of Gradole Spring Drainage Area in Central Istria, *Geologia Croatica* 48 (1), 97-106.
- Maksimović, G., 1963: Osnovi karstoveđenja, Tom I. Perm.
- Maksimović, G., 1969: Osnovi karstoveđenja, Tom II. Perm.
- Manga, M., 2001: Using Springs to Study Groundwater Flow and Active Geologic Processes, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29 (1), 201-228.
- Martin, P., Brunke, M., 2012: Faunal typology of lowland springs in northern Germany, *Freshwater Science* 31 (2), 542-562.
- Meaški, H., 2011: *Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka Plitvička jezera*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Meaški, H., Biondić, R., Loborec, J., Leskovar, K., 2019: Krški izvori u Varaždinskoj županiji u: Biondić, D., Holjević, D., Vizner, M. (ur.): *Zbornik radova 7. hrvatske konferencije o vodama*, Zagreb, Hrvatske vode, 437-446.
- Meinzer, O. E., 1923: *Outline of Ground-Water Hydrology*, US Government Printing Office, Washington D.C.
- Mladenović, J., Uzunović, O., 1963: Prilog poznavanju hidrogeologije na području sliva vrela Omble. III. JSK, Sarajevo.
- Mlinarić, M., Loborec, J., Biondić, R., 2016: Zaštita podzemnih voda – primjer procjene ranjivosti sliva izvora Gradole (Hrvatska) metodom SINTA-CS. *Inženjerstvo okoliša* 3 (1), 21-31.
- Mocior, E., Rzonca, B., Siwek, J., Plenzer, J., Płaczkowska E., Dąbek, N., Jaśkowiec, B., Potoniec, P., Roman, S., Żdziebko, D., 2015: Determinants of the distribution of springs in the upper part of a flysch ridge in the Bieszczady Mountains in southeastern Poland, *Episodes* 38 (1), 21-30.
- Mostowik, K., Górnik, M., Jaśkowiec, B., Maciejczyk, K., Murawska, M., Płaczkowska, E., Rzonca, B., Siwek, J., 2016: High discharge springs in the Outer Flysch Carpathians on the example of the High Bieszczady Mountains (Poland), *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 11 (2), 395-404.
- Mostowik, K., Krzyczman, D., Płaczkowska, E., Rzonca, B., Siwek, J. and Waławczyk, P. 2021: Spring recharge and groundwater flow patterns in flysch aquifer in the Połonina Wetlińska Massif in the Carpathian Mountains, *Journal of Mountain Science* 18 (4), 819-833, doi: 10.1007/s11629-020-6524-2.
- Negi, G. C., Joshi, V. 2004: Rainfall and Spring Discharge Patterns in Two Small Drainage Catchments in the Western Himalayan Mountains, India. *The Environmentalist* 24, 19-28, <https://doi.org/10.1023/B:ENVR.0000046343.45118.78>.
- Netopil, R., 1971: Ke Klasifikaci prameņu podle variability vydatnasti, Sbornik-Hydrological Conference, *Papers. Stud. Geogr* 22, 145-150.

- Nielson, K. G., Gill, K. M., Springer, A. E., Ledbetter, J. D., Stevens, L. E., Rood, S. B., 2019: Springs ecosystems: vulnerable ecological islands where environmental conditions, life history traits, and human disturbance facilitate non-native plant invasions, *Biological Invasions* 21 (9), 2963-2981, <https://doi.org/10.1007/s10530-019-02025-6>.
- Niraula, R. R., Sharma, S., Pokharel, B. K., Paudel, U., 2021: Spatial prediction of spring locations in data poor region of Central Himalayas, *Hydrology Research* 52 (2), 492-505, doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2020.223>.
- Novosel, M., Olujić, G., Cocito, S., Požar-Domac, A., 2005: Submarine freshwater springs in the Adriatic Sea: a unique habitat of the bryozoan *Pentapora fascialis*, in: Moyano, G., Hugo, I., Cancino, J. & Wyse Jackson, P. (eds.): *Bryozoan Studies 2004*, 215-221.
- Orešić, D., Čanjevac, I., 2020: Groundwater Resources in Croatia, in: Negm, A., Romanescu, G., Zelenáková, M. (eds.): *Water Resources Management in Balkan Countries*. Heidelberg, Springer International Publishing, 109-132.
- Oštrić, M., 2018: Priobalni izvor Blaž – pregled istraživanja u cilju zahvaćanja podzemnih voda (1968. – 2017.), *Hrvatske vode* 26 (103) 49-54.
- Paramelle, A., 1856: *L'art de decouvrir les sources*, 4. izdanje, Pariz.
- Parlov, J., Posavec, K., Bačani, A., 2007: The estimation of groundwater recharge from karst spring hydrograph (Bulaž, Croatia), in: Ribeiro, L., Chambel, A., Condeso de Melo, M. (eds.): *XXXV Congress of International Association of Hydrogeologists, Groundwater and Ecosystem*.
- Pavletić, Z. i Matonićkin, I., 1967: Saprobiološka analiza opskrbnih voda potoka Plitvičkih jezera, *Acta Botanica Croatica* 26-27 (1), 17-35.
- Perrault, P., 1674: *De L'origines des fontaines*, Comité National Français des Sciences Hydrologiques, Commission de terminologie.
- Petrik, M., 1958: Prinosi hidrologiji Plitvica, u: Šafar, J. (ur.): *Plitvička jezera, Nacionalni park*, Nacionalni park „Plitvička jezera”, Zagreb, 409-433.
- Petrik, M., 1961: *Mjerenja na vruljama*, I. JSK Split i Dalmatinska zagora 1958. Zagreb.
- Placzkowska, E., Gornik, M., Mocior, E., Peek, B., Potoniec, P., Rzonca, B., Siwek, J., 2015: Spatial Distribution of Channel Heads in the Polish Flysch Carpathians, *Catena* 127, 240-249.
- Placzkowska, E., Cebulski, J., Bryndza, M., Mostowik, K., Murawska, M., Rzonca, B., Siwek, J., 2021: Morphometric analysis of the channel heads based on different LiDAR resolutions, *Geomorphology* 375, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107546>.
- Polšak, A., 1974: Geološki aspekti zaštite Plitvičkih jezera, u: Gušić, B., Marković, M. (ur.): *Plitvička jezera – Čovjek i priroda*, NP Plitvička jezera, 25-32.
- Pozojević, I., Brigić, A., Gottstein, S., 2018b: Water mite (Acari: Hydrachnidia) diversity and distribution in undisturbed Dinaric karst springs, *Experimental and Applied Acarology* 76, 123-138, <https://doi.org/10.1007/s10493-018-0294-3>.
- Pozojević, I., Pešić, V., Goldschmidt, T., Gottstein, S., 2020: Crenal Habitats: Sources of Water Mite (Acari: Hydrachnidia) Diversity, *Diversity* 12 (9), 316, 13, doi:10.3390/d12090316.
- Pozojević, I., Pešić, V., Gottstein, S., 2019: Two water mite species (Acari: Hydrachnidia) from karst springs new for the fauna of Croatia with notes on distribution and environmental preferences, *Natura Croatica* 28 (2), 417-424. <https://doi.org/10.20302/NC.2019.28.27>.
- Pozojević, I., Ternjej, I., Mihaljević, Z., Gottstein, S., Vučković, N., Dorić, V., Rumišek, M., 2018a: Prey abundance supporting unusual water mite (Acari: Hydrachnidia) community in a sublacustrine spring and tributary river, *Acta Biologica* 25, 69-75. DOI: 10.18276/ab.2018.25-06.
- Ridanović, J., 1974: Hidrogeografske značajke Južne Hrvatske, *Hrvatski geografski glasnik* 36-37 (1), 75-85.
- Ridanović, J., 1976: Hidrogeografske značajke Nacionalnog parka Plitvičkih jezera, *Hrvatski geografski glasnik* 38 (1), 246-252.
- Radišić, M., Horvat, B., Oštrić, M., Rubinić, J., 2020: Vodni režim pronosa nanosa u slivu pazinčice i podzemnom krškom vodonosniku izvora Rakonek, u: Oskoruš, D., Rubinić, J. (ur.): *Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*, 293-296.
- Rehrl, C., Birk, S., 2010: Hydrogeological Characterisation and Modelling of Spring Catchments in a Changing Environment, *Austrian Journal of Earth Sciences* 103 (2), 106-117.
- Risko, J., 2018: Sacred Springs: Perceptions of Religion and Water in Village Communities of Uttarakhand, *Independent Study Project (ISP) Collection*, 2852.
- Rubinić, J., Cindrić Kalin, K., Nežić, M., Radišić, M., Ružić, I., 2015: Ekstremna suša na izvorištima vodoopskrbe u slivu Mirne tijekom 2012. godine, u: Biondić, D., Holjević, D. (ur.): *6. hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem: hrvatske vode na investicijskom valu*. Zbornik radova, Opatija, 20.-23. svibnja 2015., 171-180.
- Schenk, E. R.; Jenness, J. urStevens, L. E., 2018: *Springs Distribution, Flow, and Associated Species in the Verde River Basin, Arizona*, Springs Stewardship Institute Technical Report to One for the Verde. Museum of Northern Arizona, Flagstaff, AZ. 47. DOI: 10.13140/RG.2.2.27113.95846.
- Shuster, E. T., White, W. B., 1971: Seasonal fluctuations in the chemistry of lime-stone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers, *Journal of Hydrology* 14 (2), 93-128, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90001-1).
- Sinclair, D., 2018: Springs geomorphology influences on physical and vegetation ecosystem characteristics, Grand Canyon Ecoregion, USA.
- Siwek, J., Chełmicki, W., 2004: Geology and land-use related pattern of spring water quality. Case study from the catchments of the Malopolska Upland (S. Poland), *Geologica Acta* 2 (2), 167-174.
- Solger, F., 1931: Der Boden Niederdeutschlands nach seiner letzten Vereisung, *Deutsche Urzeit*, Band II (8), Verlag von Dietrich Reimer, Ernst Vohsen, Berlin.
- Spitale, D., Leira, M., Angeli, N., Cantanati, M., 2012: Environmental classification of springs of the Italian Alps and its consistency across multiple taxonomic groups, *Freshwater Science* 31 (2), 563-574.
- Springer, A. E., Stevens, L. E., Anderson, D. E., Parnell, R. A., Kreamer, D. K., Levin, L., Flora, S. P.: 2008: A Comprehensive Springs Classification System: Integrating Geomorphic, Hydrogeologic

- chemical, And Ecological Criteria, in: Stevens, L. E., Meretsky V. J., Gary Paul Nabhan, G. P. (eds.): *Aridland Springs in North America: Ecology and Conservation*, The University of Arizona Press, Tucson.
- Springer, A. E., Stevens, L. E., 2009: Spheres of discharge of springs, *Hydrogeology journal* 17 (1), 83-93, DOI 10.1007/s10040-008-0341-y.
- Steinmann, P., 1915: *Praktikum der Süßwasserbiologie. Teil 1: Die Organismen des fließenden Wassers*. Borntraeger, Berlin, 184.
- Stevens, L.E., Springer, A. E., Ledbetter, J. D., 2016: *Springs Ecosystem Inventory Protocols*, Springs Stewardship Institute, Museum of Northern Arizona, Flagstaff, Arizona.
- Stevens, L. E., Schenk, E. R., Springer, A. E., 2021: Springs ecosystem classification. *Ecological Applications* 31 (1), DOI: e002218. 10.1002/eap.2218.
- Stiny, J., 1933: *Springs, the geological foundations of springs for engineers of all disciplines as well as students of natural science*, Julius Springer Publisher, Vienna.
- Surić, M., 2005: Submerged Karst – Dead or Alive? Examples from the Eastern Adriatic Coast (Croatia), *Geoadria* 10 (1), 5-19, <https://doi.org/10.15291/geoadria.71>.
- Tambe, S., Kharel, G., Arrawatia, M. L., Kulkarni, H., Mahamuni, K., Ganeriwala, A. K., 2012: Reviving Dying Springs: Climate Change Adaptation Experiments From the Sikkim Himalaya, *Mountain Research and Development* 32 (1), 62-72.
- Thienemann A., 1924: *Hydrobiologische Untersuchungen an Quellen*, Archiv für Hydrobiologie 14, 151-190.
- Tomašić, I., 1962: Ispitivanje izvora Gradole u dolini Mirne, Tehnički izvještaj, OVP Rijeka.
- van Tubergen, A., van der Linden, S., 2002: A brief history of spa therapy, *Annals of the Rheumatic Diseases* 61, 273-275, DOI: 10.1136/ard.61.3.273.
- Vashisht, A. K., Sharma, H. C., 2007: Study on hydrological behaviour of a natural spring. *Current Science* 93 (6), 837-840.
- Vashisht, A. K., Bam, B., 2013: Formulating the spring discharge-function for the recession period by analyzing its recession curve: A case study of the Ranichauri spring (India), *Journal of Earth System Science* 122, 1313-1323, <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0356-1>.
- Veronese, G., 1939: Appunti per la storia del grande acquedotto Istriano, Padova.
- Vineyard, J., Feder, G., Pfeiffer, W., Lipscomb, R., 1982: WR29: *Springs of Missouri*, Missouri Department of Natural Resources, Division of Geology and Land Survey in cooperation with U.S. Geologic Survey and Missouri Department of Conservation.
- von Fumetti, S., Bieri-Wigger, F., Nagel, P., 2017: Temperature variability and its influence on macroinvertebrate assemblages of alpine springs, *Ecobydrology* 10:e1878., <https://doi.org/10.1002/eo.1878>.
- von Fumetti, S., Nagel, P., 2012: Discharge variability and its effect on faunistic assemblages in springs, *Freshwater science* 31, 647-656.
- von Fumetti, S., Nagel, P., Scheifhacken, N., B. Baltes, B., 2006: Factors governing macrozoobenthic assemblages in perennial springs in north-western Switzerland, *Hydrobiologia* 568, 467-475.
- Vujnović, T., 2011: Springs in the Žumberak – Samoborsko Gorje Nature Park, *Natura Croatica* 20 (1), 19-34.
- Vurnek, M., Brozinčević, A., Briški, F., Matočkin Kepčija, R., 2016: Distributional patterns of fecal indicator bacteria in spring area of Plitvice Lakes National park, *Periodicum Biologorum* 118 (1), 37-44.
- Wallace Pitts M., Alfaro C., 2001: Geologic/Hydrogeologic Setting and Classification of Springs, in: LaMoreaux P. E., Tanner J. T. (eds.): *Springs and Bottled Waters of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-56414-7_3.
- Wilson, J.; Rocha, C., 2012: Regional Scale Assessment of Submarine Groundwater Discharge in Ireland Combining Medium Resolution Satellite Imagery and Geochemical Tracing Techniques, *Remote Sensing of Environment* 119, 21-34.
- Zollhöfer, J., Brunke, M., Gonser, T., 2000: A spring typology integrating habitat variables and fauna, *Archiv für Hydrobiologie* 121 (3-4), 349-376.
- France Voyage, 2022: Fountain de Vaucluse, <https://www.france-voyage.com/tourism/fontaine-vaucluse-806.htm> (21. 1. 2022.)
- Una Spring of Life, 2022: Vrelo Une, <http://www.unaspringoflife.com/en/una/vrelo-une/1> (21. 1. 2022.)

Izvori Sources

Autor Author

Ivan Martinić
mag. geogr., asistent, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Marulićev trg 19/II,
10 000 Zagreb, Hrvatska
imartini@geog.pmf.hr