

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**  
**KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití hydrochemických dat pro hodnocení vody v pramenech v oblasti  
Lužických hor

Vedoucí práce: prof. RNDr. Dana Komínková, Ph.D

Bakalant: Alena Toporkova

2017

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle práce .....	9
3	Literární rešerše.....	10
3.1	Voda.....	10
3.1.1	Hydrologický cyklus vody .....	10
3.1.2	Hydrologie podzemní vody .....	11
3.1.3	Členění podzemních vod.....	12
3.1.4	Prameny.....	12
3.2	Fyzikálně chemické vlastnosti vody.....	14
3.2.1	Kyslík rozpuštěný ve vodě .....	14
3.2.2	Teplota.....	15
3.2.3	Hodnota pH.....	15
3.2.4	Konduktivita.....	16
3.3	Rozpuštěné látky ve vodách.....	17
3.3.1	Sodík .....	17
3.3.2	Draslík .....	18
3.3.3	Vápník a hořčík .....	18
3.3.4	Chlor.....	19
3.3.5	Síra .....	19
3.3.6	Dusík .....	20
3.3.7	Oxid uhličitý.....	21
3.3.8	Brom a křemík.....	21
3.3.9	Hliník.....	22
3.3.10	Železo .....	22
3.3.11	Těžké kovy .....	23
3.4	Izotopy v přírodních vodách .....	24
3.4.1	Stabilní izotopy .....	25
3.4.2	Tritium .....	26
4	Popis sledovaného území .....	27
5	Metodika .....	30
5.1	Výběr pramenů.....	30

5.2	Odběr vzorků.....	30
5.3	Analýza vzorků .....	30
5.4	Zpracování dat.....	31
6	Výsledky .....	32
7	Diskuse.....	38
8	Závěr .....	40
9	Použitá literatura .....	40
10	Přílohy .....	44

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Alena Toporkova

Aplikovaná ekologie

Název práce

**Využití hydrochemických dat pro hodnocení vody v pramenech v oblasti Lužických hor**

Název anglicky

**Application on of hydrochemical parameters for assessment of spring waters in the Lusatian Mountains**

---

### **Cíle práce**

Cílem BP je popsat a zdůvodnit hydrochemické složení vody ve vybraných pramenech oblasti Lužických hor.

### **Metodika**

Práce zahrnuje sběr hydrologických, hydrogeologických a hydrochemických údajů ve vybraných pramenech a zhodnocení a roztřídění výsledků. Měřené parametry budou zahrnovat kromě standardních fyzikálně-chemických ukazatelů (teplota, pH, elektrická vodivost) i koncentrace základních iontů. Vyhodnocení bude zaměřeno na hydrologické, hydrogeologické a hydrochemické charakteristiky pramenů a jejich třídění podle jejich vztahu k okolnímu horninovému prostředí.

**Doporučený rozsah práce**

35

**Klíčová slova**

hydrochemie, prameny, hydrologie, hydrogeologie, horninové prostředí

---

**Doporučené zdroje informací**

Mazor, E. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, 1991, third edition 2004: Marcel Dekker Publ., New York; 451 pp. ISBN: 0-8247-4704-6  
Pačes, T., 2011. Úvod do hydrochemie. Technická univerzita v Liberci, Praha – Liberec, 80 str. ISBN: 978-80-7372-748-2.  
Pitter, P.: Hydrochemie. 4th ed. Praha : VŠCHT Praha, 2009. P. 0001. ISBN 978-80-7080-701-9

---

**Předběžný termín obhajoby**

2016/17 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

prof. RNDr. Dana Komínková, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované ekologie

**Konzultant**

Dr. Tomáš Vitvar

---

V Praze dne 07. 04. 2017

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením prof. RNDr. Dany Komínkové, Ph.D. a uvedla jsem všechny literární prameny a publikace ze kterých jsem čerpala. Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze dne 25.04.17

.....

### **Poděkování:**

Tímto děkuji vedoucí bakalářské práce paní prof. RNDr. Daně Komínkové, Ph.D. za pozornost, kterou věnovala mé bakalářské práci, a za její odborné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat panu Dr. Tomáši Vítvarovi za odborné konzultace a paní Ing. Licie Součkové za pomoc v terénu a poskytnutí informací k vypracování této bakalářské práce. A v neposledně řadě chci poděkovat pracovníkům laboratoře za poskytnutí dat nezbytných ke zpracování této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá chemickým složením pramenů v oblasti Lužických hor. Cílem je popsat vliv hornin na složení vody na základě odebraných vzorků vody z pramenů. Na základě provedeného chemického rozboru byl každému z pramenů přiřazen chemický typ podle převládajících iontů. Byla také stanovena a zhodnocena koncentrace vybraných těžkých kovů v pramenech z určitých geologických rajonů a výsledky byly porovnány s geologickým podložím pramenů.

Z výsledků vyplývá, že převládající hydrochemický typ vody ve zkoumaných pramenech je Ca-HCO<sub>3</sub>. Kromě toho mají sledované prameny Lužických hor i zvýšený obsah síry, železa a hliníku. Hydrochemické složení vody v pramenech je značně ovlivněno antropogenní činností.

Klíčová slova: hydrochemie, prameny, Lužické hory, ionty, těžké kovy.

## **Abstract**

The major objective of this study is chemical composition of springs in the region of the Lusatian Mountains. The aim of present thesis is to identify relationships between the spring's geology and the water's chemical composition, based on sample from the studding springs. The spring's water was split by groups based on dominated ions. The average concentration of heavy metals was measured for each geological region. The results of chemical analysis were compared with the spring's geological bedrock.

The results of the experiment show that the springs of the Lusatian mountains having an increased concentration of sulfur, iron, and aluminum. The predominant type of springs is Ca-HCO<sub>3</sub>. Composition of the spring's water is highly influenced by anthropogenic activities.

Keywords: hydrochemistry, springs, Lusatian Mountains, ions, heavy metals.



## 1 Úvod

Vlastností přírodních vod jsou důležité jak z geologického, tak i z ekologického hlediska. V oblasti geologie je voda důležitá především svou transportní a geochemickou funkcí. V oblasti ekologie je voda základní složkou biosféry. Z toho plyne závislost složení přírodních vod na geologických a ekologických procesech, přičemž tento vliv je oboustranný. Studium přírodních vod je proto nezbytnou součástí poznání vzniku a vývoje geologického složení Země a jejího životního prostředí (Pačes, 1982).

Podzemní a povrchové vody Lužických hor a jejich srážkově bohatého okolí slouží k zásobování obyvatelstva pitnou vodou. V roce 2001 činil průměrný odběr ze všech jímacích míst na saské straně Lužických hor až  $78 \text{ l s}^{-1}$ . Před několika lety v rámci společného česko-saského projektu „GRACE“ (Kalinová et al., 2014) proběhl podrobný hydrogeologický výzkum, zaměřený na ochranu a využívání podzemní vody na území západních Sudet, jejichž součástí jsou i Lužické hory. Tento projekt se zabýval hlavně hydrologickými a hydrogeologickými poměry podzemních vod (Kalinová et al., 2014). Rozbor chemického složení podzemní vody je významnou doplňující informací a je nezbytný pro poznání hydrogeologických procesů, probíhajících v oblasti Lužických hor.

## 2 Cíle práce

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním interakce vody s geologickým podložím v oblasti Lužických hor, Liberce a Ještědu. Cílem je provést třídění pramenů podle iontového složení vody na základě výsledků chemické analýzy, určit genezi vody a popsat vliv hornin na chemismus a oběh podzemní vody. Součástí práce je také porovnání obsahu stopových prvků a koncentrace hlavních iontů ve vodách různého geologického prostředí vybraných 20 pramenů.

### 3 Literární rešerše

#### 3.1 Voda

Voda je podmínkou existence života na Zemi, má výjimečné postavení mezi přírodními látkami a je nenahraditelná (Pelikán, 1983). Z celkové plochy Země (510 mil. km<sup>2</sup>) zaujímá povrch oceánů a moří 361 mil. km<sup>2</sup> (70,8 %). Voda na Zemi je však rozdělena rovnoměrně (Fictum, 1980).

Souhrn veškeré vody na Zemi je hydrosféra, zahrnující část atmosféry, povrch Země a část zemské kůry. Největší část hydrosféry tvoří slaná voda (97,4 %). Sladká voda tvoří 2,6 % vody na Zemi, z čehož čtyři pětiny jsou uloženy v polárním ledu a ledovcích. Jenom 0,27 % z hydrosféry je použitelné jako zdroj pitné vody a jsou to podzemní a povrchové vody (Heintz, 1993).

##### 3.1.1 Hydrologický cyklus vody

Množství vody vyskytující se na Zemi je stále konstantní v průběhu hydrologického cyklu a mění se pouze skupenství a kvalita vody. Voda se v biosféře pohybuje vlivem sluneční energie, která způsobuje vypařování vody z povrchu oceánu. Dále se vodní páry kondenzují a vytváří se oblaka a srážky. Vypařování také probíhá z ploch povrchových vod, rostlin (transpirace) a půdy (Fictum, 1980).

Velký oběh vody lze popsat rovnicí hydrologické bilance:

$$H_S = H_O + H_E + H_R \quad (mm) \quad (\text{rov. 1})$$

kde  $H_S$  je průměrná výška vrstvy vody ze srážek (mm),  $H_O$  je průměrná výška vrstvy odtokové vody (mm),  $H_E$  je průměrná výška vrstvy vypařené vody (mm) a  $H_R$  je průměrná výška vrstvy vody, která zvětší či zmenší zásoby vody. Všechny hodnoty musí být naměřené ve stejném časovém intervalu; čím je doba měření delší, tím přesnější jsou členy rovnice (Fictum, 1980).

Kolem 80 % srážek se navrátí do oceánu a zbylých 20 % dopadne na pevninu a stává se hlavním zdrojem vod povrchových a podzemních. Každé povodí, do kterého spadají srážky, má odlišné vlastnosti horninového podkladu. Tím se změní vlastnosti srážkové vody, neboť teoreticky každé povodí má unikátní chemické vlastnosti (Gray, 2010). Hornina může působit jako filtr, který zadržuje suspendované částice a odstraňuje rozpustné látky. Některé látky se z hornin do vody naopak uvolňují, a proto

stále probíhá výměna chemických prvků mezi vodou a horninou (Heintz, 1993).

Zároveň na vodu působí fyzikálně chemické účinky horniny, zejména adsorpce škodlivin a iontová výměna (zvláště u jílu). Probíhají i čisté chemické reakce. Hornina však může zachytit jenom určitou míru škodlivin (Heintz, 1993).

### 3.1.2 Hydrologie podzemní vody

Podzemní voda je veškerá voda v kapalném skupenství pod zemským povrhem a je tedy součástí hydrosféry i geosféry. Její pohyb, chemické složení a fyzikální vlastnosti jsou určovány charakterem horninového prostředí, přičemž tento vliv je oboustranný a voda také působí na charakter horniny (Neruda, 2014). Nepropustné horniny, především jíly, břidlice a slíny, brání pohybu vody, zatímco přes propustné horniny se voda může jednoduše pohybovat. Mezi propustné horniny patří pískovec, vápenec, křída, hlína, rašelina a zeminy s obsahem jílu méně než 25 %. Největší objem vody obsahují písky, štěrky a štěrkopísky (Bumerl, 2003).

Na režim podzemní vody mají vliv sluneční aktivita, cirkulace vzduchových hmot, geologická struktura, klimatické a geografické poměry, vegetace a antropogenní činnost. Zásoby podzemní vody se doplňují infiltrací atmosférických srážek, na niž má vliv složení horniny, její propustnost a zrnitost. Množství podzemní vody může být také ovlivněno infiltrací povrchových vod a zároveň může dojít k přítoku podzemní vody do povrchových vod (Starý, 2005).

Podzemní vody jsou většinou mineralizovanější a obsahují menší množství kyslíku než povrchové vody. Koncentrace oxidu uhličitého v podzemních vodách je vyšší než u povrchových vod a koncentrace organických látek je nízká (Žáček, 1981).

Hlavní hydrologickou charakteristikou podzemní vody je průměrná výška hladiny podzemní vody, kterou lze vyjádřit nadmořskou výškou nebo hloubkou pod zemským povrchem (Pavelková, Frajer, 2012). Pro výpočet bilance podzemních vod slouží rozdíly mezi nejvyšším a nejnižším stavem hladiny podzemní vody. Pro přesný výpočet bilance je potřebné sledovat hladinu podzemní vody alespoň jeden hydrologický rok, aby bylo možno hodnotit hydrologický stav podzemní vody a umožňují jeho prognózování. Pozorování hydrologického stavu podzemních vod se provádí v pozorovací síti. Základní jednotkou sítě je hydrologický rajon. Hydrologický rajon je území s obdobnými hydrologickými poměry, typem zvodnění a oběhem podzemní vody (Starý, 2005).

### 3.1.3 Členění podzemních vod

Z hydrologického hlediska lze rozdělit přírodní podzemní vodu na půdní vody, podzemní vody prosté a minerální vody. Podzemní vody prosté jsou vody s obsahem rozpuštěných látek nebo oxidu uhličitého pod  $1000 \text{ mg l}^{-1}$ , minerální vody mají koncentrací těchto látek nad  $1000 \text{ mg l}^{-1}$  (Bumerl, 2003).

Zásoby podzemní vody se doplňují infiltrovanou vodou, vadózní vodou, která vzniká kondenzací vodních par v půdě, a juvenilní vodou, která vzniká kondenzací vodních par z chladnoucího magmatu v průběhu geologického cyklu (Bumerl, 2003).

Genezi a jakost vod ovlivňují procesy: rozpouštění hornin, srážení nerozpustných složek, adsorpce, desorpce a výměna iontu mezi látkami rozpuštěnými ve vodě a horninou, aerobní či anaerobní odstranění organických látek a mísení vod různého původu (Žáček, 1981).

Rozpouštění hornin je proces, při kterém přecházejí molekuly a ionty vody z jedné fáze do druhé. Molekuly minerálu rozpouštěných ve vodě disociují na ionty a při srážení se znovu spojí do molekul minerálu (Pačes, 2009).

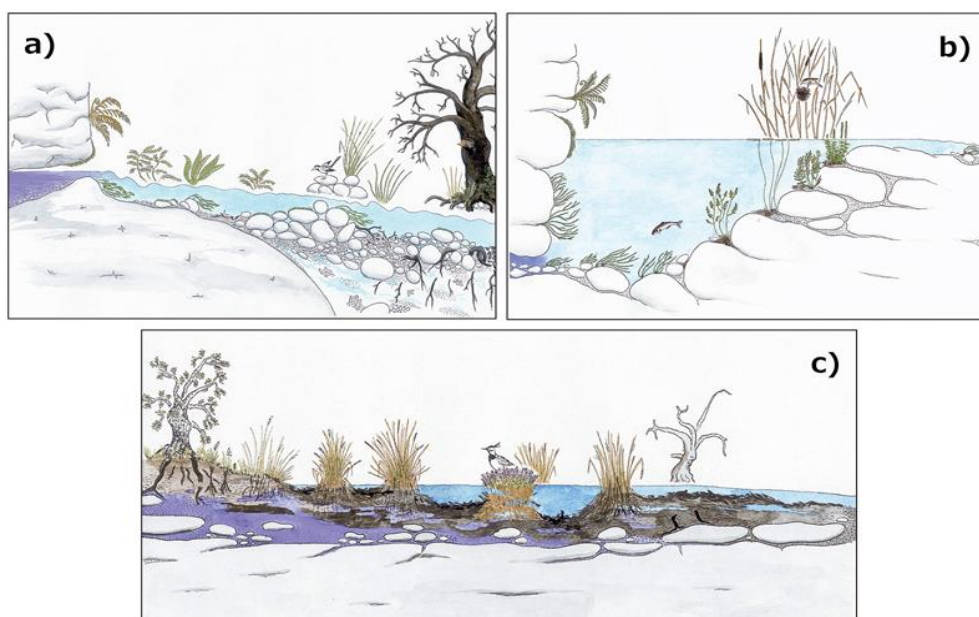
Adsorbované ionty lépe podléhají iontové výměně. Adsorpce a desorpce nejvíce ovlivňují koncentraci kationtů  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  a méně koncentraci kovových kationtů  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  a  $\text{Cu}^{2+}$ . Koncentrace aniontů je ovlivněna adsorpcí a desorpcí velmi málo, přičemž  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  neadsorbují. Adsorpce, desorpce a iontová výměna jsou zvláště významné v jemnozrnných sedimentech (Pačes, 2009).

Rozlišují se dva základní principy hydrochemické klasifikace, které lze kombinovat: klasifikace podle převládajících iontů a klasifikace podle charakteristických iontových kombinací (Pitter, 2015). Podle iontových složek lze rozdělit podzemní vodu do tří skupin: hydrogenuhličitanové vody, síranové vody a chloridové vody. Každou z těchto skupin lze dále rozdělit na podskupiny s převládajícím kationtem:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  (Martoň et al., 1984).

### 3.1.4 Prameny

Prameny jsou přirozené vývěry podzemní vody. Vydávnost pramenů se mění podle ročních období a může být v různých sezónách proměnlivá. U některých pramenů se změnou ročního období dochází ke změně teploty a jakosti vody (Zelinka, 2003).

Prameny obvyklé vznikají v místě styku dvou horninových vrstev s různou mírou propustnosti. Prameny se dělí podle způsobu svého vzniku. Rozptýlené prameny vznikají na místě, kde je rozpuklá hornina, a v ostatních případech se jedná o soustředěné prameny. Podle způsobu, jak se voda dostává na povrch, se prameny dělí na sestupné a výstupné. Sestupné prameny vznikají volným výnorem vody po nepropustném podloží, u výstupných pramenů je voda vytlačována na povrch vlivem nepropustných hornin. U periodických pramenů voda teče pouze v určitých časových intervalech. Pokud tento proces probíhá bouřlivě a je způsoben plynem, jedná se o gejzír (Bumerl, 2003).



Obr. č. 1 Typy pramenů: a) reokren b) limnokren c) helokren (Brendelberger et al., 2015)

Prameny lze podle vzhledu rozdělit do tří skupin: limnokrenní, reokrenní a helokrenní prameny. Limnokrenní pramen vytvoří prohlubeň, ve které se voda na určitou dobu zdrží a pak odteče do pramenné stružky. Reokrenní pramen prudce vyvěrá z podzemí, ihned vytváří pramennou stružku a voda rychle odtéká. Helokrenní prameny se vytváří průsakem na větší ploše, jsou to pramenní mokřady, které obvykle mají víc než jedno místo vývěru (Štěrba, 1986).

## 3.2 Fyzikálně chemické vlastnosti vody

Molekula vody se skládá z jednoho atomu kyslíku a dvou atomů vodíku. Atomy jsou spojeny mezi sebou kovalentní vazbou, již lze charakterizovat jako sdílení elektronu mezi dvěma atomy. Kovalentní vazba je nejsilnější typ chemické vazby, a proto se molekuly vody nerozpadají v atmosféře na atomy. Atomy vodíku jsou umístěny v molekule vody asymetricky, a proto má molekula vody polární charakter. Bipolárnost vody způsobuje, že mezi molekulami vody existuje slabá molekulová interakce (Davie, 2008). Další důležitou vlastností vody je schopnost tvořit vodíkové vazby. Z toho vyplývá, že molekuly vody mají sklon sdružovat se ve větších celcích. Díky všem těmto vlastnostem má voda maximální hustotu při teplotě 3,98 °C (Pitter, 2015).

Voda vyskytující v přírodě není chemicky čistá a vždy obsahuje rozpuštěné organické a anorganické látky. Část látek přijímá již v atmosféře, ale k jejímu hlavnímu obohacování dochází při interakci vody s půdou a horninami (Pitter, 2015).

### 3.2.1 Kyslík rozpuštěný ve vodě

Kyslík se vyskytuje ve vodě ve stabilní molekulové formě a dostává se do vody difuzí z atmosféry nebo při fotosyntéze vodních rostlin. Je nezbytný například pro aerobní rozklad organických látek, nitrifikaci a oxidaci železa, manganu a sulfidů. Koncentrace kyslíku má přímý vliv na samočištění přírodních vod – pokud je kyslík vyčerpán, dochází například k redukci dusičnanů a následně k redukci síranů na toxický sulfan. Kyslík se podílí na biochemických procesech probíhajících ve vodě a je limitujícím faktorem pro život organismů. Čisté přírodní vody mají koncentraci kyslíku vyšší než znečištěné vody (Pitter, 2015).

Množství kyslíku rozpuštěného ve vodě se vyjadřuje v mg l<sup>-1</sup> nebo procentech rovnovážné koncentrace kyslíku ve vodě za určitých hodnot teploty a tlaku. Pokud je obsah kyslíku odlišný od rovnovážného stavu, dojde k vyrovnávání s atmosférou. Rychlost vyrovnání závisí na teplotě, ploše povrchu vodní nádrže, rozdílu hodnot nasycení a rychlosti promíchání vody a ovzduší. Jakost povrchových vod se určuje také dle koncentrace kyslíku ve vodě, zatímco u podzemních vod se koncentrace kyslíku obvykle nestanovuje (Kopp, 2015).

### 3.2.2 Teplota

Teplota je organoleptickou vlastností vody, což znamená, že tato vlastnost je zjištělná smyslovými orgány. Má vliv na chemické složení vody a biologické procesy, její údaj je nezbytný při výpočtu chemických rovnováh, při stanovování spotřeby kyslíku ve vodě, při hodnocení samočištění vod atd. Významně zvyšuje podíl toxického nedisociovaného amoniaku na celkové koncentraci amoniakálního dusíku. (Pitter, 2015).

Trojný bod (rovnovážný stav mezi tuhou, kapalnou a plynnou fází vody) nastává při teplotě 0,01 °C nebo 273,15 K (Pelikán, 1988).

Hodnoty teploty ovlivňují rychlost chemických reakcí a koncentrací rozpouštěných plynů ve vodě. Čím je teplota vyšší, tím méně se v ní plyn rozpouští. Hlavními zdroji ovlivňující teplotu vody jsou sluneční záření, geotermální zdroje a lidská činnost. Teplo z vody se dále uvolní procesem vyzařování, konvekcí, vypařování nebo přechodem tepla do dna a břehu (Kopp, 2015).

Teplota podzemní vody závisí na hloubce vrstvy, ze které voda pochází, a také na rychlosti proudění. Obvykle nabývá hodnot v rozmezí 5-13 °C (Tölgyessy, 1984). V průběhu roku se obvykle pohybuje v hodnotách kolem 10 °C, větší kolísání teploty u podzemní vody je důsledek rychlé infiltrace povrchové vody do podzemí (Kopp, 2015).

Prameny mají teplotu vody nejstálejší v místě jejího přímého vývěru z horniny. Nejmenší rozdíly teplot jsou u ranních měření. Podrobné sledování teplot pramenů v závislosti na teplotě vzduchu a atmosférických srážkách umožňuje posoudit hloubku podzemního oběhu vyvěrající vody (Pelikán, 1988).

### 3.2.3 Hodnota pH

Hodnota pH je dána koncentrací iontu vodíku a má velký vliv na chemické a biochemické procesy v nádržích, a proto je její měření nezbytné pro každý rozbor vody. V čistých přírodních vodách je hodnota pH v rozmezí od 4,5 do 9,5 obvykle dána uhličitánovou rovnováhou. Pokles hodnoty pH pod 4,5 je způsoben přítomností volných anorganických nebo organických kyselin, naopak její vzestup nad 8,3 znamená, že voda obsahuje uhličitany (Pitter, 2015).

V moderní době je častý problém okyselování přírodních vod oxidem siřičitým (SO<sub>2</sub>) a oxidem dusičitým (NO<sub>2</sub>) pocházejících ze spalování fosilních paliv. Přírodní voda s vysokým obsahem uhličitanu má určitou míru odolnosti vůči těmto procesům

(Martin, 2013). Hodnota pH také ovlivňuje rozpustnost solí železa, vápníku, fosforu a je důležitá pro vodní ekosystém (Kopp, 2015).

Hodnota pH vody se odvíjí také od koncentrace vápenaté a hořečnaté soli ve vodě (Rétháti, 1983). Přírodní vody s vysokým obsahem vápníku mají vysoké hodnoty pH, naopak vody s vysokým obsahem humidních látek, oxidů síry, oxidů dusíku a minerální vody mají hodnoty pH nižší. Intenzivní fotosyntéza vodních rostlin zvyšuje pH vody. U dna vodních nádrží, kde je vliv fotosyntézy velmi slabý, se hodnota pH v průběhu dne skoro nemění (Kopp, 2015).

U podzemní vody na hodnotu pH působí podzemní atmosféra, ve které je obsah CO<sub>2</sub> vyšší než na povrchu. Hlavní účinek CO<sub>2</sub> je okyselení vody. Pro podzemní vody, které nemají přístup ke zdrojům CO<sub>2</sub>, jsou charakteristická vysoká hodnota pH (až 9,4) a vysoký obsah sodíku (kolem 300 mg l<sup>-1</sup>). Jakmile se voda dostane do pásma, do kterého vniká hlubinný CO<sub>2</sub>, je velmi rychle obohacována vodíkovými ionty a její pH se pohybuje kolem 7 (Pačes, 1982).

Je několik metod pro měření hodnoty pH. Nejrychlejší a nejjednodušší je měření pomocí indikátoru s barevnou stupnicí, tento způsob se však z důvodu malé přesnosti používá jen zřídka. Pro měření přímo ve vrtech, pramenech a povrchových vodách je nutné použít metody potenciometrické (elektrochemická analytická metoda). Měření pH-metrem se zpravidla provádí v klidnější části toku nebo se odebere vzorek vody do nádoby a v něm se provede měření. Pro správný rozbor vody je nezbytné dělat kontrolní měření metodou odlišnou od použité (Pelikán, 1988).

Hodnota pH vyjadřuje koncentraci kationtů H<sup>+</sup>. V čisté vodě při teplotě 25 °C dosahuje rovnovážná koncentrace hydroxoniových kationtů a hydroxidových aniontů hodnoty 10<sup>-7</sup> mol kg<sup>-1</sup> a jejich součin, nazývaný iontový součin vody, má hodnotu 10<sup>-14</sup> (Sedmidubský et al., 2011).

### **3.2.4 Konduktivita**

Konduktivita je mírou koncentrace ionizovatelných anorganických a organických součástí vody a slouží ke kontrole výsledků chemického rozboru vody a k charakteristice celkové mineralizace vody. Jednotkou konduktivity je S m<sup>-1</sup> a její hodnota závisí na koncentraci iontů, jejich oxidačním čísle a teplotě. Vzrůst nebo



pokles teploty o 1 °C způsobují změnu konduktivity nejméně o 2 %, a proto má velký význam změření teploty při vzorkování (Pitter, 2015).

Stanovení konduktivity je běžnou složkou rozboru vody a při kontrole výsledku se součet dílčích konduktivit aniontů a kationtů porovná s konduktivitou naměřenou při stejné teplotě (Pitter, 2015).

Její hodnoty se mohou výrazně měnit v ročním období a jsou závislé na množství infiltrovaných srážek. V sušším období se konduktivita následkem zahušťování vody a zvýšení koncentrace iontů ve vodě zvětšuje (Kopp, 2015).

### 3.3 Rozpuštěné látky ve vodách

Většinu rozpustných látek v sladké přírodní vodě tvoří čtyři kationty ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), tři anionty ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) a neionizovaný oxid křemičitý (který se vyskytuje ve většině přírodních vod ve formě  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ). Jejich podíl na všech rozpuštěných látkách ve vodě se pohybuje v rozmezí 95 až 99 %. Přítomnost těchto prvků je důsledkem jejich hojného rozšíření v zemské kůře a jejich podíl ve složení vody vyplývá z geochemických vlastností lokality. V povrchových vodách a podzemních vodách procházejících přípovrchovou vrstvou, které jsou zároveň neovlivněné lidskou činností, je podíl  $\text{Ca}^{2+}$  větší než  $\text{Mg}^{2+}$  a podíl  $\text{Na}^+$  větší než  $\text{K}^+$ , zatímco koncentrace  $\text{Cl}^-$  je relativně nejmenší (Brezonik, Arnold, 2011). S hloubkou se obvykle zvětšuje koncentrace  $\text{Cl}^-$  a celková mineralizace (Pačes, 1982).

#### 3.3.1 Sodík

Ve vodě se sodík nejčastěji vyskytuje ve formě kationtu, v minerálních vodách tvoří iontové asociáty s  $\text{HCO}_3^-$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ . Obsah sodíku v zemské kůře je 2,6 % a jeho zdrojem ve vodě jsou alkalické hlinitokřemičitany, solná ložiska a některé jílové minerály (Kopp, 2015). Do podzemní vody se vyluhuje sodík z albitu ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), slídy a živců. Tento prvek se může dostat do vody při výměně iontů  $\text{Ca}^{2+}$  za  $\text{Na}^{2+}$  při styku vody s jílovými minerály. Sodík je esenciální prvek a jeho mezní hodnota pro pitnou vodu v ČR je 200 mg l<sup>-1</sup>. Vysoké koncentrace sodíku mohou vést k zasolení půd (Pitter, 2015). Obvykle se koncentrace sodíku v přírodních vodách pohybuje mezi jednotkami až desítkami mg l<sup>-1</sup>, minerální vody mohou mít koncentraci sodíku nad tisíci mg l<sup>-1</sup> (Kopp, 2015).

### 3.3.2 Draslík

Draslík je stejně jako sodík esenciální prvek a nejčastěji se vyskytuje ve vodě ve formě jednoduchého kationtu. Jeho podíl na složení zemské kůry je 2,4 % a do vody se obvykle uvolňuje z hlinitokřemičitanu a z odklizových draselných solí (Kopp, 2015). Zdrojem draslíku ve vodě jsou především ortoklas ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), sylvin ( $\text{KCl}$ ) a sylvinit ( $\text{KCl}+\text{NaCl}$ ). Přírodní draslík obsahuje kolem 0,011 % radioaktivního izotopu  $^{40}\text{K}$ , který emituje záření  $\beta$  a  $\gamma$  a tvoří přírodní pozadí radioaktivity vody. S touto vlastností draslíku je nutno počítat při posuzování radioaktivity vod (Pitter, 2015). Koncentrace draslíků v přírodních vodách obvykle tvoří jenom 4 až 10 % množství sodíku, ale v některých odpadních vodách může draslík nad sodíkem převažovat (Kopp, 2015).

### 3.3.3 Vápník a hořčík

Vápník a hořčík jsou prvky vyskytující se ve vodě ve formě jednoduchých kationtů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ , přičemž jejich zastoupení v zemské kůře je 0,035 % a 0,02 %. Do vody se vyluhují z hlinitokřemičitanů vápenatých a hořečnatých (Pitter, 2015). Vápník je obvykle dominantní ve vodách sedimentárních hornin České křídové pánve, a to zejména následkem hydrolyzy kalcitového tmelu a slínovců. Ve vodách kyselých aluminosilikátových hornin podíl vápníku často převažuje nad sodíkem při nízké mineralizaci vody. Koncentrace vápníku se může zvýšit interakcí vody s granodioritem. Hořčík je dominantní u vod ve styku s dolomitem ( $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$ ) a magnezitem ( $\text{MgCO}_3$ ) (Pačes, 1982).

Množství vápníku a hořčíku v podzemní vodě závisí na rozpuštěném  $\text{CO}_2$ , který zrychluje zvětrávání hlinitokřemičitanů. Čisté přírodní vody obsahují vápník v desítkách až několika set  $\text{mg l}^{-1}$  a hořčík od jednotek až do několika desítek  $\text{mg l}^{-1}$ . V minerálních vodách může být koncentrace hořčíku v desítkách  $\text{mg l}^{-1}$  a koncentrace vápníku může převyšovat  $100 \text{ mg l}^{-1}$  (Pitter, 2015). Při hodnotě pH nad 9 vápník tvoří iontové asociáty (např.  $[\text{CaHCO}_3]^+$ ) a při pH nad 10 i hydroxokomplexy ( $[\text{CaOH}]^+$ ). Vápník ovlivňuje stabilitu pH a má výraznější schopnost vytvářet komplexy s kovy než hořčík (Kopp, 2015).

### 3.3.4 Chlor

Chlor se ve vodě nejčastěji vyskytuje ve formě jednoduchých iontů  $\text{Cl}^-$ . Sloučeniny chloru mohou mít oxidační stupeň od -I do +VII. Ionty chloru s větším stupněm než -I působí jako oxidační činidla na organické látky a jako redukční na ionty železa, sodíku, manganu a síry (Brezonik, Arnold, 2011).

Přírodní chlor se vyluhuje do vody z ložisek kamenných a draselných solí. Běžná koncentrace chloridů v povrchových a prostých podzemních vodách dosahuje hodnot v jednotkách až desítek  $\text{mg l}^{-1}$ , v minerálních vodách může jejich koncentrace dosahovat i několik tisíc  $\text{mg l}^{-1}$  (Pitter, 2015). Z přírodních vod mají vysokou koncentraci chloru primární vulkanické a fosilní vody (Pačes, 1982).

Koncentrace chloridů, stejně jako koncentrace sodíkových iontů, je výrazně ovlivněna blízkostí dopravních komunikací. V zimním období jsou dopravní komunikace ošetřovány solí, což vede k několikanásobnému zvýšení koncentrace chloridů a sodíku (Kopp, 2015).

### 3.3.5 Síra

Ve vodě se může síra vyskytovat v organických a anorganických sloučeninách, ale nejrozšířenější forma jejího výskytu ve vodách je jednoduchý iont  $\text{SO}_4^{2-}$ . V anaerobních podmínkách a v odpadních vodách se může síra vyskytovat ve formě sulfanu. Jako organická sloučenina je síra přítomna v bílkovinách a aminokyselinách a její koloběh ve vodě je založen na procesech redukce a oxidace (Kopp, 2015).

Hlavními zdroji síranu ve vodě jsou sádrovec, anhydrit a sulfidické rudy. Ve vodách s vysokou koncentrací mohou sírany tvořit iontové asociáty (sulfatokomplexy), které zvyšují agresivitu vody. V povrchových a prostých podzemních vodách dosahuje průměrná koncentrace síranů desítek až stovek  $\text{mg l}^{-1}$ . V pitné vodě nesmí koncentrace síranů přesahovat  $250 \text{ mg l}^{-1}$  (Pitter, 2015). Sírany jsou z chemického hlediska stabilní, ale v anaerobních podmínkách podléhají procesu redukce na sulfan (Tourková, 1996).

Sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ) vzniká v přírodě rozkladem biologických látek, redukcí síranů, důsledkem vulkanické činnosti a vyluhováním z ložisek ropy a zemního plynu. Je toxický (Herčík, 2006). Vyskytuje se většinou u dna vodních nádrží, kde je nedostatek kyslíku, neboť v aerobních podmínkách podléhá oxidaci a rozkládá se na sírany. Stabilní je při hodnotách pH nižších než 6, při vyšších hodnotách se rozpadá na jednoduché ionty  $\text{S}^{2-}$  a  $\text{HS}^-$  (Kopp, 2015). Povrchové vody jen zřídka obsahují sulfan

a jeho přítomnost je indikátorem, že se voda nacházela nějaký čas v anaerobních podmínkách (Pitter, 2015).

Koncem 20. století způsobilo spalování fosilních paliv zvýšení koncentrace síranů v přírodních vodách na území západních Sudet. V průběhu posledních 30 let jejich koncentrace pomalu klesá, ale stále síran zůstává jedním z dominantních iontů (Mickiewicz, Marszalek, 2016). Dle Jetela (1989) existuje na území Jizerských hor spojitost mezi koncentrací hliníku v pramenech a jejich nadmořskou výškou, což je způsobeno tím, že prameny ve vyšších polohách jsou více ovlivněny kyselými dešti (Zdeněk et al., 1989).

### 3.3.6 Dusík

Dusík patří k nejdůležitějším makrobiogenním prvkům a vzniká v přírodě rozkladem organických dusíkatých látek. Zdrojem znečištění vody dusíkem jsou především odpady ze zemědělské výroby a splaškové odpadní vody. Ve vodě se většinou vyskytuje elementární, organicky vázaný a anorganicky vázaný dusík. Z anorganické vázané formy je především důležitý amoniakální dusík  $N - NH_4^+$  a  $NH_3$ , dusitanový dusík  $N - NO_2^-$  a dusičnanový dusík  $N - NO_3^-$  (Kopp, 2015). Sloučeniny dusíku ve vodách jsou málo stabilní a v závislosti na pH a oxidačně-redukčním potenciálu podléhají chemickým a biochemickým přeměnám (Pitter, 2015).

Amoniakální dusík je toxická látka, která se do vody dostane především rozkladem organických dusíkových látek. Ve vodě se vyskytuje ve dvou formách  $NH_4^+$  a  $NH_3$  (Pitter, 2015). Koncentrace  $NH_3$  závisí na celkové koncentraci amoniakálního dusíku, pH vody a teplotě (Brezonik, Arnold, 2011). Procesem oxidace se rozkládá na dusitany až dusičnany. Je snadno rozkládán biochemickými reakcemi, ale chemická oxidace nastává jenom za přítomnosti chloru ve vodě. V podzemních vodách je koncentrace amoniakálního dusíku velmi malá a její zvýšení je indikátorem fekálního znečištění (Pitter, 2015). Forma  $NH_3$  je toxická pro vodní živočichy a její koncentrace v pitné vodě nesmí přesahovat  $0,01 \text{ mg l}^{-1}$  (Brezonik, Arnold, 2011).

Dusičnany vznikají biochemickou oxidací amoniakálního dusíku a jejich průměrná koncentrace v českých pitných vodách podzemního původu činila  $3,92 \text{ mg l}^{-1}$  v roce 2012 (Pitter, 2015). Tato sloučenina není stabilní v anaerobním prostředí. Koncentrace dusičnanů v podzemních vodách je závislá na pH a horninovém prostředí a může se pohybovat ve velkém rozmezí. Při styku s elementárním železem podléhají dusičnany

redukcí. Dusičnany jsou málo toxické, ale mohou se přeměňovat do více toxických forem. Způsobují eutrofizaci povrchových a podzemních vod a slouží jako indikátor znečištění vod odpadními vodami ze zemědělství (Pitter, 2015). Dusičnany jsou dobře rozpustné ve vodě a patří mezi jedny z nejslabších ligandů vyskytujících se v přírodních vodách. Ve vodě jsou fotochemicky aktivní a uplatňují se v produkci hydroxylových radikálů (Brezonik, Arnold, 2011).

### 3.3.7 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý se dostává do vody z atmosféry, rozkladem organické hmoty a dýcháním vodních živočichů. Koncentrace oxidu uhličitého je součet koncentrací tří forem – volného oxidu uhličitého, hydrogenuhlíčitanu a uhlíčitanu. V přírodních vodách je oxid uhličitý přítomen při hodnotách pH menších než 8,3, zatímco při hodnotách pH do 10,5 se vyskytuje ve formě hydrouhlíčitanu. Podzemní vody obvykle obsahují  $\text{CO}_2$  v desítkách  $\text{mg l}^{-1}$ . Vysoký obsah  $\text{CO}_2$  ve vodě zvyšuje agresivitu vody vůči některým materiálům a způsobuje problémy s dýcháním u vodních živočichů (Kopp, 2015).

Hydrouhlíčitan ( $\text{HCO}_3^-$ ) je běžná složka přírodních vod, často tvořící dominantní aniont. Při vysokých teplotách se rozpadá na oxid uhličitý a uhlíčitany, které vstupují do reakcí s kovy. V podzemních vodách se koncentrace hydrogenuhlíčitanu pohybuje v rozmezí desítek až stovek  $\text{mg l}^{-1}$  (Pitter, 2015). Vysoká koncentrace hydrouhlíčitanu je typická pro oblasti slabě mineralizovaných vod v oblasti s mírným podnebím (Mickiewicz, Marszalek, 2016).

### 3.3.8 Brom a křemík

Přírodní zdroje bromu jsou mořská voda, fosilní minerální vody a řasy (Pitter, 2015). Nejčastěji se ve vodě vyskytuje ve formě iontu  $\text{Br}^-$ . Je dobře rozpustný ve vodě a v hydrologii se používá k indikaci zdrojů zasolení vody a určení geneze vody (Winid, 2015). Sloučeniny bromu jsou obvykle doprovázeny sloučeninami chloru. V povrchových a podzemních vodách ČR se koncentrace bromidů pohybuje mezi jednotkami a desítkami  $\mu\text{g l}^{-1}$ , v pitné vodě nesmí být koncentrace vyšší než  $10 \mu\text{g l}^{-1}$ . Hlavními zdroji znečištění jsou odpadní vody z chemického a farmaceutického průmyslu (Pitter, 2015). V blízkosti zemědělských ploch může být vysoký obsah bromu způsoben použitím pesticidů. Zvýšená koncentrace bromu byla také

pozorovaná v lokalitách skládek, hodnoty zde však nepřesahovaly  $10 \text{ mg l}^{-1}$  (Winid, 2015).

Křemík je široce rozšířený prvek, tvoří skoro třetinu složení zemské kůry a je přítomen ve veškeré přírodní vodě. Patří mezi esenciální látky. Do vody se dostává ze živců, slídy, pyroxenu a amfibolu. V podzemních vodách je hlavním zdrojem křemíku zvětrávání hlinitokřemičitanů a křemičitanů. Rozpustnost křemíku závisí na pH. Při hodnotách pH vyšších než 9 se vyskytuje křemík ve formě  $\text{Si(OH)}_4$  a v kyselých vodách ve formě  $\text{SiO}_2$  (Pitter, 2015). V podzemních vodách západních Sudet byly pozorovány vyšší koncentrace křemíku ve vodách s vysokým obsahem hliníku. Mezi molární hmotou těchto dvou prvků existuje určitý stupeň korelace (Dobrzyński, 2006). Antropogenním zdrojem křemíku jsou odpadní vody z výroby skla a keramiky (Pitter, 2015).

### 3.3.9 Hliník

Hliník se vyluhuje do vody ze slíd, živců a jílových minerálů. Vysoký obsah hliníku mají muskovit  $\text{KAl}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ , albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), anortit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) a kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Důležitým zdrojem hliníku jsou také bauxit a kamenná břidlice. Antropogenním zdrojem hliníku jsou odpadní vody z úpravy hliníku, kožnedělného a textilního průmyslu. Anomálně vysoké koncentrace hliníku lze pozorovat v blízkosti těžby sulfidických rud, uranu a hnědého uhlí, kde je vysoká koncentrace hliníku doprovázena vysokým obsahem železa a síry, v případě sulfidických rud ještě i mědi. Za přírodní pozadí v podzemních vodách považován koncentrace do  $0,1 \text{ mg l}^{-1}$  (Pitter, 2015). Koncentrace hliníku je přímo úměrná hodnotě pH. Také kyselé deště mohou zvýšit obsah hliníku v přírodních vodách (Hruška, Krám, 1994). Dle Muldera et al. (1989) existuje vztah mezi koncentrací  $\text{NO}_3$  a hliníku (Hruška, Krám ex. Mulder, 1989) a podobné vztahy existují i mezi jinými anionty a hliníkem. V případě vysoké koncentrace aniontů ve vodě se obsah hliníku zvětšuje (Hruška, Krám, 1989).

### 3.3.10 Železo

Hlavním zdrojem železa jsou pyrit, lepidokrotit, magnetovec, limonit a siderit. Malé množství železa obsahují i hlinitokřemičitaný. Rozpustnost železa ve vodě závisí na hodnotě pH, oxidačně redukčním potenciálu a přítomnosti látek tvořících komplexy se železem. Oxid uhličitý a humínové kyseliny zvyšují rozpustnost železa. Množství

rozpuštěného železa ve vodě mohou ovlivnit některé druhy bakterií (Pitter, 2015). V anaerobních podmínkách se nejčastěji vyskytuje železo ve formě  $\text{Fe}^{3+}$ , v aerobních ve formě  $\text{Fe}^{2+}$ . Obě formy podléhají reversibilní oxidaci a redukci. Koncentrace železa v podzemních vodách nepřesahuje  $1 \text{ mg l}^{-1}$  (Tourková, 1996).

### 3.3.11 Těžké kovy

Těžké kovy jsou stopové chemické prvky s hustotou vyšší než  $5 \text{ g cm}^{-3}$  (Loučka, 2014). Nejnebezpečnější z nich jsou z důvodu toxicity kadmium, rtuť, olovo a chrom. Hlavními zdroji těžkých kovů jsou imise, odpady energetických a průmyslových provozů. Jedním z největších rizik pro životní prostředí je schopnost těžkých kovů se akumulovat v živých organizmech (Tourková, 1996).

Rtuť patří mezi toxické kovy, nejtoxičtější jsou metyl- a fenyl- sloučeniny. Při nízkých hodnotách pH převažuje vazba na organické látky, při vysokých hodnotách na jílové materiály (Herčík, 2006). Elementární rtuť je dobře rozpustná ve vodě s vysokým obsahem kyslíku a silně se akumuluje na sedimenty. Zdrojem znečištění jsou fungicidní a insekticidní prostředky a jiné průmyslové odpady (Tourková, 1996).

Kadmium často doprovází zinek v rudách a jeho průměrná koncentrace v podzemních vodách na území ČR je  $0,95 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  (Pitter, 2015). Kadmium je vysoce toxický prvek se silnou akumulační schopností. Jeho rozpustnost je ovlivněná koncentrací uhličitánů a hydroxidů kadmia. Zdrojem znečištění jsou vody z povrchové úpravy kovů, fotografického a polygrafického průmyslu (Tourková, 1996).

Olovo je toxický prvek, jehož výskyt v horninovém prostředí je vázán na sirníky (galenit), sírany a karbonáty. Jeho koncentrace ve vodě se zvyšuje přítomností kyseliny sírové, chloridů nebo hydrogenuhličitánů a je omezená hodnotou pH (Tourková, 1996). Za přírodní pozadí se považuje koncentrace do  $20 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  (Pitter, 2015).

Měď je prvek s nižší toxicitou a je nezbytný pro zdravý vývoj rostlinných a živočišných organismů. V závislosti na koncentraci může působit jako mikroživina nebo cizorodá látka. V horninovém prostředí je měď vázaná na sirníky a její rozpustnost je ovlivněná hodnotou pH a koncentrací oxidu uhličitého. Zdrojem znečištění jsou fungicidy a odpadní vody z povrchové úpravy kovů (Herčík, 2006). V přírodních vodách nepřevyšují koncentrace mědi  $20 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  (Pitter, 2015).

Zinek je podobně jako měď esenciální látkou (Herčík, 2006). Jeho množství ve vodě nesmí přesahovat  $0,05 \text{ mg l}^{-1}$ , neboť jinak může způsobit úhyn vodních živočichů. Jeho rozpustnost je ovlivněná hodnotou pH a koncentrací oxidu uhličitého. Zdrojem znečištění jsou odpadní vody z galvanického pokovování, výroby viskózy a nádobí ze zinkového plechu (Tourková, 1996). Vysoký obsah zinku mají i vody v blízkosti sulfidických rud (Pitter, 2015).

Zdrojem přírodního chromu jsou chromit, krokoit a jiné minerály obsahující chrom (Pitter, 2015). Chrom je toxický prvek a jeho jedovatost je dána oxidačním stupni. Nejjedovatější formou výskytu chromu ve vodě je  $\text{Cr}^{6+}$ . Jeho koncentrace v podzemních vodách se pohybuje v rozmezí jednotek  $\mu\text{g l}^{-1}$  a zaleží na oxidačně-redukčním potenciálu. Zdrojem znečištění jsou odpadní vody z koželužen, z povrchové úpravy kovů a textilního průmyslu (Tourková, 1996). V podzemních vodách se koncentrace chromu pohybují mezi  $1 \mu\text{g l}^{-1}$  až  $3 \mu\text{g l}^{-1}$  (Pitter, 2015).

Nikl je toxický prvek s původem v ultrabazických horninách (Tourková, 1996) a do vody se často dostává vyluhováním z hadců (Pitter, 2015). Obvykle se vyskytuje společně se sírou, arsenem a antimonem. Průměrná koncentrace niklu v podzemních vodách je  $20 \mu\text{g l}^{-1}$ . Zdrojem znečištění jsou odpadní vody z povrchové úpravy kovů (Pitter, 2015). V horských oblastech západních Sudet byla pozorovaná vysoká koncentrace niklu (max.  $3,96 \mu\text{g l}^{-1}$ ), která může být způsobena přítomností metamorfovaných hornin amfibolitu a serpentinitu. Mickiewicz a Marszałek (2016) sledovali závislost koncentrace arsenu a zinku na koncentraci niklu, což ukazuje na jejich stejný původ.

### 3.4 Izotopy v přírodních vodách

Izotopy jsou nuklidy se stejným počtem protonů, avšak různým počtem neutronů v atomu (Pitter, 2015). Ve vodách jsou významné radioaktivní izotopy tritium  $^3\text{H}$  a stabilní izotopy deuterium  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  a  $^{34}\text{S}$ . Tritium, deuterium a  $^{18}\text{O}$  jsou součástí molekuly vody, zatímco ostatní jsou součástí rozpuštěných látek. Radioaktivní izotopy se používají pro odhad stáří vody a stabilní izotopy pomáhají určit původ vody a procesy, při kterých došlo k izotopové frakcionaci (vypařování a kondenzace). Izotopy mají stejné chemické vlastnosti, ale procesy jako je vypařování, srážení nebo výměna kyslíku působí odlišně na každý izotop stejného prvku (Pačes,



2009). Izotopy lze rozdělit do dvou velkých skupin – stabilní (atomové číslo je konstantní) a radioaktivní (Rétháti, 1983).

### 3.4.1 Stabilní izotopy

V hydrologii jsou nejobvyklejší stabilní izotopy  $^{18}\text{O}$  a izotop vodíku – deuterium  $^2\text{H}$ . Koncentrace těchto izotopů ve srážkách a tím i v celém následujícím vodním cyklu je spojená s teplotou, přičemž poměr je vyšší v tropických oblastech a v nížinách a menší v horách (Rétháti, 1983).

Deuterium se vyskytuje v přírodních vodách ve formě  $^1\text{H}^2\text{HO}$  a jeho koncentrace je kolem 320 ppm. Kyslík 18 se vyskytuje ve formě  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ , jeho koncentrace v přírodní vodě je kolem 2000 ppm. Je to hojně používaný izotop a jeho analýza spolu s deuteriem patří k nejméně komplikovaným a nákladným mezi ostatními izotopy v hydrologii a hydrogeologii (Mandel, Shiftan, 1981).

Pro vyjádření izotopového složení v číselné hodnotě je používána odchylka od standardního poměru izotopů v oceánu SMOW (Standard Mean Ocean Water):

$$\text{Odchylka (Delta)} = \delta = \left( \frac{R_S}{R_{SMOW}} - 1 \right) 1000 \text{ (promile - ‰)} \quad (\text{rov. 2})$$

Kde  $R_S = ^2\text{H}/^1\text{H}$  nebo  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ve vzorku zkoumané vody a  $R_{SMOW} = ^2\text{H}/^1\text{H}$  nebo  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  je poměr izotopů v oceánu, přijímaný jako standard (Mandel, Shiftan, 1981).

Menší  $\delta$  je u ledovců ( $^2\text{H}$  kolem -200 ‰,  $^{18}\text{O}$  kolem -30 ‰), větší je v bezodtokých oblastech ( $^2\text{H}$  kolem +20 ‰,  $^{18}\text{O}$  kolem +2 ‰). Mezi množstvím  $^2\text{H}$  a  $^{18}\text{O}$  ve srážkách existuje lineární závislost, kterou pro kontinentální polární oblasti vyjadřuje rovnice:

$$\delta_D = (8,04 \pm 0,14)\delta_{18} + (9,5 \pm 1,5) \quad (\text{rov. 3})$$

Koncentrace  $^2\text{H}$  a  $^{18}\text{O}$  se může výrazně měnit v závislosti na množství srážek (Daansgaard, 1964).

Izotopy, zvláště  $^{18}\text{O}$ , jsou úspěšně využívány pro výzkum podzemní vody. Tento izotop slouží k určení oblastí doplňování podzemních vod, a to díky závislosti koncentraci izotopu na teplotě. Orografické srážky mají koncentraci  $^{18}\text{O}$  menší než srážky v nížinách. Pro Evropu je tento rozdíl kolem 0,2  $\delta$  na každých 100 m. Deuterium

jako samotné nemá uplatnění ve výzkumu podzemní vody, ale v případě použití společně s  $^{18}\text{O}$  slouží k identifikaci povrchových vod, u kterých došlo k vypařování (Mandel, Shiftan, 1981).

Mořská voda obsahuje skoro nulové hodnoty  $\delta^2\text{H}$  a  $\delta^{18}\text{O}$ , magmatická voda má  $\delta^2\text{H}$  -5 ‰ až -80 ‰ a  $\delta^{18}\text{O}$  +6 ‰ až +9 ‰. Juvenilní vody v dnešní době skoro nemají vliv na izotopické složení přírodních vod (Pačes, 1982).

Významné pro použití stabilních izotopů  $^2\text{H}$  a  $^{18}\text{O}$  je to, že při rozpouštění minerálů za normálních teplot přecházejí do roztoku atomy se stejným izotopovým složením jako ve výchozím minerálu. Při srážení minerálů je zase izotopické složení minerálu ovlivněno izotopickým složením roztoku vody. Izotopy  $^2\text{H}$  a  $^{18}\text{O}$  jsou tedy nejen stabilní, ale i konzervativní, což umožňuje úvahy o horninovém prostředí vzniku chemického složení vody. Izotopické složení vody je podobné izotopickému složení minerálů, kterými voda prochází, a tím způsobem izotopy slouží jako stopovače pohybu vodního toku. Izotopové metody se používají pro objasnění původu vod a doplňují tak hydrochemické metody (Pačes, 1982).

### 3.4.2 Tritium

Tritium je v přírodních vodách většinou umělého původu, přičemž v minulosti byly jeho hlavním zdrojem pokusné výbuchy jaderných zbraní. V dnešní době je příčinou zvýšené koncentrace tritia ve vodním cyklu především provoz jaderných reaktorů a v menší míře hodinářský průmysl. Většina přírodního tritia vzniká ve vysokých vrstvách atmosféry (Pitter, 2015), kdy se pod vlivem rychlých neutronů kosmického záření atmosférický dusík rozpadá na izotop uhlíku  $^{12}\text{C}$  a tritium. Tritium pak se srážkovou vodou proniká do podzemních vod (Mazor, 2004).

Tritium emituje slabé beta záření a poločas jeho rozpadu je 12,43 let. Koncentrace tritia ve vodě se vyjadřuje v TU (tritium units), které se rovnají poměru 1 atomu  $^3\text{H}$  k  $10^{18}$  atomu  $^1\text{H}$ , nebo  $1,185 \text{ Bq l}^{-1}$ . Údaje o  $^3\text{H}$  se používají při určení stáří podzemní vody, zvláště u mělké podzemní vody a pramenů (Mandel, Shiftan, 1981). Staří vody je doba, za kterou se voda dostane z místa infiltrace do místa vývěru. Pro určení stáří podzemní vody je nutné porovnat aktivitu tritia v srážkách s aktivitou tritia ve vodě v místě vývěru (Mazor, 2004). Pro odhad stáří vody lze použít model Piston-flow, který vyjadřují rovnice:

$$A(t) = A_{in}(t_t) \exp(-\lambda t_t) \quad (\text{rov. 4})$$

Kde  $A(t)$  je aktivita tritia v podzemní vodě v čase  $t$ ,  $A_{in}(t_i)$  je aktivita tritia v srážkách v čase  $t_i$ ,  $\lambda$  je rozpadová koncentrace tritia a  $t_t$  je stáří podzemní vody (Maloszewski, Zuber, 1996).

Jednodušší odhad stáří podzemní vody je založen na datech o zvýšení koncentrace tritia po zkouškách jaderných zbraní. Tak voda s nulovou koncentrací tritia (v praxi méně než 0,5 TU) je infiltrovaná před rokem 1952, voda s koncentrací větší než 10 TU je voda infiltrovaná po roce 1952 a vody s koncentrací mezi 0,5-10 TU jsou směsí těchto vod (Mazor, 2004).

## 4 Popis sledovaného území

Zkoumané území se nachází v Libereckém kraji. Převažující část vybraných pramenů se nachází v okolí Liberce a Ještědsko-kozákovského hřbētu, nejzápadnější prameny leží v okolí Nového Boru na Zákupské pahorkatině (BS1016, BS1017) a nejjihnější prameny se nacházejí v okolí Českého Dubu na Turnovské pahorkatině (ES1008, ES1009). Nejsevernější prameny se nacházejí v okolí Krompachu (BS1019, BS1018, BS1027). Jeden pramen se nachází na území Lužického hřbetu (EN1011).



Obr. 2. Topografická mapa zkoumaných pramenů (projekt „Prameny spojují krajiny a lidi“, *arcgis.com*).

Z hlediska geologického třídění patří východní část sledovaného území k západosudetské oblasti a západní k české křídové pánvi (Mištera et al., 1985). Západosudetská oblast je mozaikou regionálně geologických jednotek s určující rolí variského vrásnění. Sledované území patří k lužickému plutonu, krkonošsko-

jizerskému krystaliniku a krkonošsko-jizerskému plutonu. Lužický pluton vystupuje na západě západosudetské oblasti při styku s krkonošskou oblastí a dominantními horniny jsou granodiorit a žula. Na výhodě od lužického plutonu je západosudetská oblast tvořena jednotkami krkonošsko-jizerského krystalinika, které se skládá převážně z ortorul, svorů a fylitů. V době variské orogeneze do tohoto krystalinika proniklo těleso granitoidu – krkonošsko-jizerský pluton. Krkonošsko-jizerský pluton tvoří Jizerské hory a je zastoupen hlavně porfyrickým biotickým granitem. Známou charakteristickou vlastností tohoto plutonu jsou živce zbarvené dorůžova. Severní část křídové pánve tvoří horizontálně uložené sedimenty mořského původu. Převládají zde pískovce, slínovce a opuky (Chlupáč, 2002).

Z hlediska geomorfologie řadíme zkoumané území do Krkonošské oblasti, ve které se nachází nejvyšší bod České vysočiny a Severočeské tabule. Součást Krkonošské oblasti tvoří horní masiv Jizerských hor s plochým reliéfem na povrchu a vysokým zlomovým svahem na severní straně. Severočeskou tabuli tvoří reliéf pahorkatin a stupňovité uspořádaných plošin (Míštěra et al., 1985).

Geologické poměry oblasti podmiňují výskyt ložisek nerostných surovin. V Libereckém kraji se těží nízkoobsahový uran. Pět ložisek uranu se nachází v okrese Česká Lípa, a to Hamr, Stráž, Osečná-Kotel, Holičky a Křížany. Dva další doly, Křížany a Břevniště, jsou vytěženy. V Žitavské pánvi v okolí Žitavy a Hrádku nad Nisou se vyskytují ložiska lignitu. Na svazích Ještědsko-kozákovského hřbetu se vyskytují netěžená ložiska dolomitů a vápenců. Čedič a melafyr se těží v okolí České Lípy a Jablonce nad Nisou. Poblíž Českého Dubu a Hrádku nad Nisou se těží cihlářské suroviny (Liberecký kraj, 2009).

Podle Quitta (1971) leží celé území s výjimkou Jizerských hor v mírně teplém a suchém podnebí, s létem dlouhým 20 až 60 dnů a krátkými přechodovými obdobími, zatímco zima je krátká, suchá a mírně teplá s krátkou dobou trvání sněhové pokrývky (Míštěra 1985 ex. Quitt, 1971). Průměrný roční úhrny srážek v západní části Libereckého kraje je 600-800 mm a průměrná roční teplota vzduchu je 6-8 °C (ČHMÚ, 2016). Jizerské hory mají mírně chladné a vlhké podnebí s dlouhými přechodovými obdobími a s chladným létem, které trvá méně než 20 dní (Míštěra et al., 1985). Jizerské hory mají největší roční průměrné srážkové úhrny na území ČR, a to 1000-1200 mm; průměrná roční teplota vzduchu je 3-6 °C (ČHMÚ, 2016).

Sledované území se dělí na tři hydrologické rajony. Prameny patřící do hydrologického rajonu krystalinika Jizerských hor, se nacházejí v povodí Lužické

Nisy po Mandavu s číslem hydrologického pořadí 2-04-07 a rozlohou 389 km<sup>2</sup>. Část sledovaného území v hydrologickém rajonu krystalinika Krkonoš a Jizerských hor má povodí Jizery od Kamenice po Klenici s hydrologickým pořadovým číslem 1-05-02 a s rozlohou 1166 km<sup>2</sup>. Poslední z rajonů je rajon křídly Horní Ploučnice a Horní Kamenice, který je významný jako kolektor podzemní vody. Tento rajon spadá do povodí Ploučnice a hydrologické pořadové číslo je 1-14-03 s rozlohou 1199 km<sup>2</sup> (ČHMÚ, 2016).

Půdní fond sledovaného území se skládá z hnědých půd nižších poloh, hnědých půd vrchovin a podzolů (Míštěra et al., 1985). Z půdních typů je nejhojnější kambizem, na kterém se nachází celkem devět pramenů (DN1012, BS1027, BS1018, BS1019, BS1003, ES1008, EN1011, EN1020, EN1022): všechny prameny Lužického hřbetu (Heřmanický vodopád, prameny u Krompachu), část pramenů Liberecké kotliny a pramen u Vítkovského potoka. Na území Liberecké kotliny jsou také rozšířené podzolní půdy (EN1002, EN1004, DN1010, EN1027) a pramen u Starého Harcova (EN1015) leží na antropozemi. Na podzolním typu půdy leží i prameny Ještědsko-kozákovského hřbetu (EN1005, EN1006) a pramen u Radvance (BS1016). Dva prameny, Lesnovek (ES1009) a Ortel (BS1017), patří k luvizemím a, pramen vedle Janova dvora (ES1014) se nachází v pseudoglejích (Geoportál, 2016).

Území má malý podíl orné půdy, tvořící pouze 8,8 až 30,3 % z celkové rozlohy zemědělské půdy. Naopak travní porosty jsou hojně rozšířené a tvoří 19,7 až 31,2 % plochy zemědělské půdy. Celé území je erozně ohroženo, silně acidifikováno a má vysoké ztráty humusu. Na území jsou rozšířené odvodněné lokality, což může mít negativní vliv na vodní režim (eAGRI, 2015).

Dle Zlatníka (1976) se rostlinstvo Jizerských hor skládá ze smrkovo-bukovo-jedlového, smrkového a klečového společenství. Flora na západ od Jizerských hor patří k bukovo-jedlovým společenstvím (Míštěra 1985 ex. Zlatník 1976). Na celém území jsou rozšířené přechodová rašeliniště. Dominantní zástupci těchto biotopů jsou rašeliníky ze sekcí *Cuspidata*, *Subsecunda* a *Sphagnum* a ploníky (*Polytrichum commune* a *P. strictum*). Hojně se zde vyskytuje vegetace podhorských a horských smilkových trávníků a acidofilních bučin. V části Jizerských hor se vyskytuje vegetace otevřených vrchovišť, kde dominantní složkou je rašeliník (Chytrý et al., 2010).

Z hlediska hospodářských aktivit je Liberecká oblast významná převážně jako centrum textilního průmyslu (vlnářství, bavlnářství). Strojní průmysl je zastoupen

výrobou textilních strojů, automobilů a naftových motorů. Z hlediska zemědělského využití jsou nejvíce zastoupeny paseky a lesy (Míštěra et al., 1985).

## **5 Metodika**

### **5.1 Výběr pramenů**

Studie byla provedená v rámci evropského projektu „Prameny spojují krajiny a státy“, podporovaného česko-saským programem Interreg 2014-2020. Výběr pramenů byl proveden s ohledem na pestrost geologického podloží, rozmanitost vegetace a kulturní význam pro krajinu. Bylo vytipováno celkem 46 pramenů v okolí Žitavy a Liberce, kde poté probíhal odběr vzorků. Tato bakalářská práce zkoumá 20 pramenů z převážně východní části vybraného území. Pramen s číslem DN1012 v lokalitě Vítkovského potoka nebyl zkoumán z důvodu vysušení. Pramen s číslem EN1020 nebyl v této práci analyzován, protože odběr vody v tomto pramenu proběhl pouze jednou, a proto nebylo možné popsat případnou rozmanitost chemického složení vody tohoto pramene. Celý seznam hodnocených pramenů je uveden v přílohách Tab. č.1 a Tab. č.2.

### **5.2 Odběr vzorků**

Odběr vzorků vody byl prováděn v jedno-až dvouměsíčních intervalech během roku 2016. Vzorky byly odebírány do laboratorních PET lahví. Pro vzorkování vody pro chemický rozbor byly použity lahve o objemu 250 ml. Voda pro stanovení hlavních iontů nebyla konzervovaná, zatímco voda pro stanovení stopových prvků byla konzervovaná kyselinou dusičnou ( $\text{HNO}_3$ ). Vzorky pro analýzu izotopového složení vody byly odebrány do lahví o objemu 20 ml a nebyly konzervované. Před odběrem vzorku byla každá odběrová láhev několikrát propláchnutá odebíranou vodou. Každý vzorek byl po odběru označen indikačním číslem. Po odběru byly vzorky uchovány v chladničce a poté zpracovány v laboratoři.

### **5.3 Analýza vzorků**

Fyzikálně chemické vlastností vody byly měřeny v terénu. Hodnoty pH, konduktivity, teploty a rozpuštěného kyslíku ve vodě byly stanoveny laboratorním přenosným multimetrem HACH HQ30D a přenosnými sondami.

Obsah iontů byl stanovený v laboratoři Technické univerzity Drážďany v Žitavě. Pro stanovení koncentrace kationtů byly použity spektrometrické metody: optická (ICP-OES) podle technické normy DIN EN ISO 11885 a hmotnostní (ICP-MS) podle technické normy DIN EN ISO 17294-2. Metoda OES slouží k stanovení podílu  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Si}$  a  $\text{Ca}^{2+}$  v  $\text{mg l}^{-1}$ . Metoda MS byla použita ke stanovení  $\text{Cr}^{\text{III}}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Al}$  a  $\text{Fe}$  v  $\mu\text{g l}^{-1}$ , ale v případě vysoké koncentrace těchto prvků byla použita metoda OES. Koncentrace aniontů  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , a  $\text{SO}_4^{2-}$ , byly stanoveny metodou vysokoúčinné kapalinové chromatografie (HPLC) podle technické normy DIN EN ISO 10304 1.

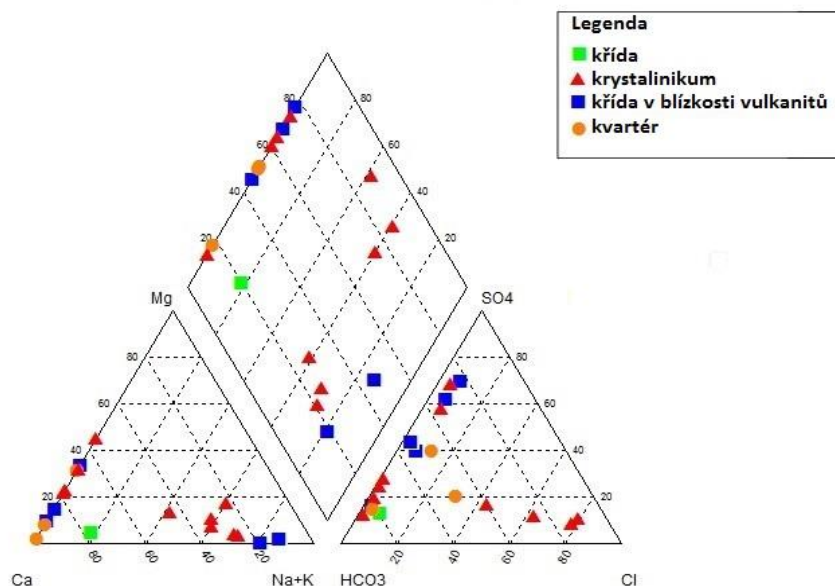
#### 5.4 Zpracování dat

Ze získaných dat byly vypočteny průměrné koncentrace hlavních iontů ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) a stopových prvků ( $\text{Fe}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{\text{III}}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ). Klasifikace podle převládajících hlavních iontů byla provedena pomocí softwarového prostředí Aquachem 4.0.. Výsledky jsou znázorněny pomocí Piperova grafu, kde zastoupení iontů je vyjádřeno v procentech z celkové koncentrace. Na vertikály trojúhelníků Piperova grafu se vynášejí procentní zastoupení hlavních kationtů a aniontů, zatímco v kosočtverci je znázorněn bod průseku aniontů a kationtu (Pačes, 2011). V programu MS Excel byla pro každý pramen sestavena tabulka průměrných hodnot chemické analýzy, doplněná údaji o poloze a geologickém podloží.

Pro porovnání vody v pramenech z hlediska geologického podloží byla všechna data roztríděna do čtyř kategorií: křída, křída v blízkosti vyvýšenin vulkanitů, kvartér a krystalinikum (mapa pramenů podle příslušných geologických kategorií je uvedena v přílohách, mapa č.1). Výsledky jsou znázorněny v podobě Stiffových diagramů (Pačes, 2011), které ukazují hodnoty hlavních kationtů a aniontů v příslušných geologických rajonech. Na rozdíl od Piperova diagramu, který ukazuje procentní zastoupení iontů, Stiffův ukazuje absolutní hodnoty.

## 6 Výsledky

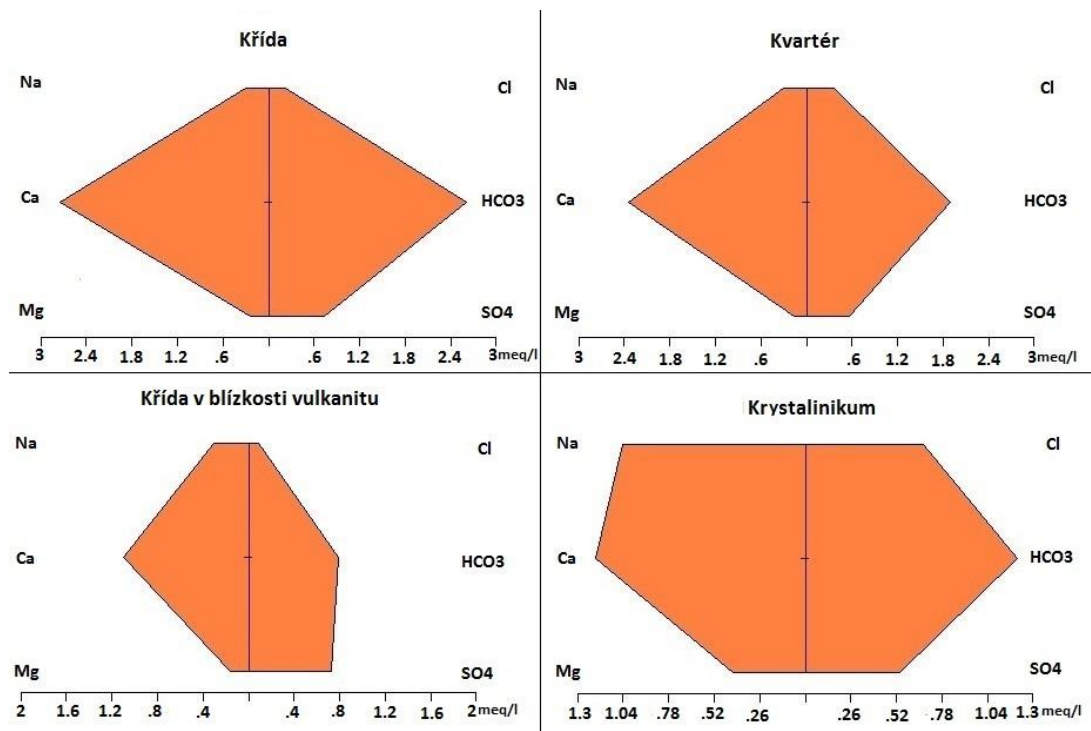
Na grafu č.1 jsou znázorněny chemické typy vody v 18 zkoumaných pramenech.



Obr. 3. Piperův graf zkoumaných pramenů

Většina pramenů křída a kvartéru má dominantní kation vápník ( $\text{Ca}^{2+}$ ), ale zároveň i poměrně vysoké zastoupení sodíku ( $\text{Na}^+$ ) a draslíku ( $\text{K}^+$ ). Výjimkou jsou dva prameny (BS1019 a BS1018, oba se nacházejí na území české křída), kde zastoupení vápníku ( $\text{Ca}^{2+}$ ) je vzhledem k ostatním kationtům poměrně nízké. Na rozdíl od pramenů geologických rajonů křída a kvartéru mají prameny krystalinika téměř v polovině případů sodík ( $\text{Na}^+$ ) jako hlavní kationt. Na území krystalinika se hojně vyskytují prameny s dominantním aniontem chloru ( $\text{Cl}^-$ ), naopak mezi prameny křída a kvartéru má pouze pramen ES1014 poměrně vysoké zastoupení chloru ( $\text{Cl}^-$ ). Z pramenů s významným obsahem hořčíku ( $\text{Mg}^{2+}$ ) jsou dva, které patří do křída a kvartéru, následně dva do krystalinika. Nejhojnějším dominantním aniontem je hydrogenuhličitan ( $\text{HCO}_3^-$ ), jedinou výjimkou je pramen BS1018 (křída), kde dominantním aniontem je síran ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), pravděpodobně následkem výskytu sádrovců.



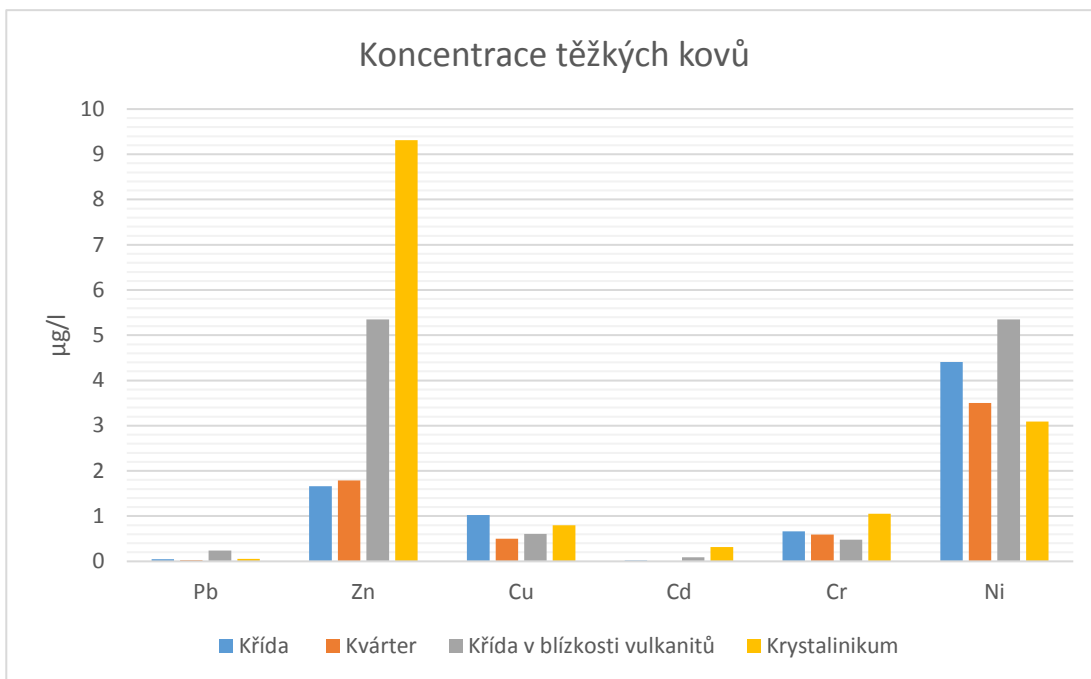


Obr. 4. Porovnání koncentrací iontů v různých geologických rajonech pomocí Stiffova diagramu.

Iontové složení vody v rajonech křída a kvartéru je velice podobné. Hlavním kationtem je vápník ( $\text{Ca}^{2+}$ ) a hlavním aniontem je hydrogenuhličitan ( $\text{HCO}_3^-$ ). V těchto geologických rajonech mají ostatní ionty výrazně menší poměr zastoupení ve vodě.

Prameny křída v blízkosti vulkanitů mají velmi odlišné iontové složení od těchto dvou rajonů. Celková koncentrace iontů v těchto pramenech je nižší a rozdíl mezi obsahem sodíku ( $\text{Na}^+$ ) a vápníku ( $\text{Ca}^{2+}$ ) je také nižší. Podíl hydrogenuhličitanů ( $\text{HCO}_3^-$ ) a síranů ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) je přibližně stejný.

Prameny krystalinika mají téměř obdobný poměr sodíku ( $\text{Na}^+$ ) a vápníku ( $\text{Ca}^{2+}$ ) a s nejvyšším podílem hořčíku ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ze všech geologických skupin. Dominantním aniontem je hydrogenuhličitan ( $\text{HCO}_3^-$ ). Koncentrace chloru ( $\text{Cl}^-$ ) a síranů ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) je velmi vysoká v porovnání s ostatními prameny. Zvýšené koncentrace síranů mohou naznačovat rezidua zatížení sírany v době výrazných kyselých dešťů.



Obr. 5. Porovnání těžkých kovů v geologických rajonech.

Prameny všech geologických rajonů mají poměrně vysokou koncentraci zinku a niklu. Koncentrace niklu nepřesahují průměrnou koncentraci podzemních vod, která dle Pittera (2015) je  $20 \text{ mg l}^{-1}$ . Koncentrace zinku v pramenech EN1020 ( $49 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ ) a BS1003 ( $34 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ ) se blíží k hranici, za kterou nastává úhyn vodních živočichů (Tourková, 1996). Prameny křída a kvartéru mají koncentraci zinku skoro stejnou -  $1,8\text{-}1,9 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ , v pramenech křída v blízkosti vulkanitů se zvětšuje do  $5,2 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  a v horninách krystalinika dosahuje své maximální hodnoty -  $9,2 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ . Nejnižší podíl niklu mají prameny krystalinika ( $3 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ ) a nejvyšší prameny křída ( $5,2 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ ).

Koncentrace olova dosahuje maximální hodnoty v pramenech křída v blízkosti vulkanitů -  $0,15 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  a minimální v pramenech křída -  $0,05 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ . Koncentrace mědi se výrazně nemění a kolísá mezi  $0,5 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  (kvartér) a  $1 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$  (křída). Koncentrace kadmia ve vodě je velmi nízká a nepřesahuje  $0,1 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ , výjimkou jsou prameny krystalinika, kde jeho koncentrace dosahují  $0,3 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ . Obsah chromu ve vodě dosahuje maximální hodnoty ( $1 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ ) v pramenech krystalinika. Koncentrace chromu v pramenech křída a kvartéru se pohybují mezi  $0,5\text{-}0,7 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ .

Většina pramenů má vysoký obsah železa. V pramenech kvartéru a křída se průměrná koncentrace železa pohybuje v rozmezí  $13,5 \text{ mg l}^{-1}$  až  $341,5 \text{ mg l}^{-1}$  a v pramenech krystalinika v rozmezí  $2,5 \text{ mg l}^{-1}$  až  $25,3 \text{ mg l}^{-1}$ .

V pramenech všech geologických rajonů přesahuje koncentrace hliníku přírodní pozadí podzemních vod, která se dle Pitteru rovna  $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ , avšak průměrná

koncentrace hliníku v pramenech se pohybuje od 0,9 mg l<sup>-1</sup> až do 880 mg l<sup>-1</sup>.

### 6.1 Prameny křídý a kvartéru

1) *BS1003*: Voda je chemického typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. U pramene BS1003 nízká hodnota pH způsobuje anomálně vysokou koncentraci Al a Fe. Obsah těchto kovů však není stálý a výrazně se mění v závislosti na době odběru vody. Na jaře je koncentrace Fe 38 mg l<sup>-1</sup> a na podzim dosáhne hodnoty 645 mg l<sup>-1</sup>. Koncentrace Al naopak klesá z 1510 mg l<sup>-1</sup> na 250 mg l<sup>-1</sup>. Obdobná je situace Ni<sup>2+</sup> a Zn<sup>2+</sup>, na jaře jejich koncentrace odpovídá 22 µg l<sup>-1</sup> a 63,1 µg l<sup>-1</sup>, ale na podzim klesne na 9,3 µg l<sup>-1</sup> a 5,2 µg l<sup>-1</sup>. Průměrná koncentrace dusičnanů je 11,14 mg l<sup>-1</sup>. Vysoká koncentrace těchto prvků poukazuje na možnou kontaminaci pramene průmyslovými vodami z úpravy kovů.

2) *BS1016*: Voda je chemického typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Jde o pramen s nízkým obsahem rozpuštěných látek ve vodě, jehož chemický typ je charakteristický pro podzemní vody nacházející se ve styku s pískovcem obsahujícím vyšší podíl karbonátových minerálů, pravděpodobné dolomitů. Průměrná koncentrace Ni<sup>2+</sup> se rovná 5,2 µg l<sup>-1</sup> a Zn<sup>2+</sup> 2,9 µg l<sup>-1</sup>. Ostatní těžké kovy se vyskytují jen ve stopovém množství. V průběhu vzorkování se koncentrace dusičnanů pohybovaly mezi hodnotami 4,5 mg l<sup>-1</sup> a 5,3 mg l<sup>-1</sup>.

3) *BS1017*: Voda je chemického typu Na-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>. V prameni BS1017 je dominantním kationtem Na<sup>+</sup> a jeho průměrná koncentrace činí 20 mg l<sup>-1</sup>, což je typické pro kyselé magmatické horniny s vysokým podílem živců a slíd. Koncentrace Al a Fe je nízká, s výjimkou října, kdy došlo k náhlému zvýšení podílu těchto kovů. Obsah Fe stoupl z 2,5 µg l<sup>-1</sup> do 250 µg l<sup>-1</sup> a Al z 7 µg l<sup>-1</sup> do 32 µg l<sup>-1</sup>. Koncentrace těžkých kovů je nízká. Průměrná koncentrace dusičnanu je 16,86 mg l<sup>-1</sup> a ukazuje na možnou kontaminaci pramene odpadními vodami ze zemědělství.

4) *BS1018*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Pramen BS1018 má vysoký podíl Ca<sup>2+</sup> (24,35 mg l<sup>-1</sup>) a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (37,1 mg l<sup>-1</sup>), což může být důsledkem kontaktu vody se sádrovcem. Průměrná koncentrace Ni<sup>2+</sup> (5,3 µg l<sup>-1</sup>) je jedná z nejvyšších ze všech zkoumaných pramenů. Obsah železa (13,5 mg l<sup>-1</sup>) a hliníku (5,9 mg l<sup>-1</sup>) je v porovnání s ostatními prameny poměrně nízký. Koncentrace dusičnanů je velmi nízká a dosahuje pouze 2,1 µg l<sup>-1</sup>.

5) *BS1019*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>. Pramen BS1019 má vysoký obsah Ca<sup>2+</sup> (38,9 mg l<sup>-1</sup>) a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (101,7 mg l<sup>-1</sup>), což vypovídá o možné interakci vody s uhličitanovými minerály, pravděpodobně s kalcitem.

6) *BS1027*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Pramen BS1027 má velmi nízký obsah rozpuštěných látek ve vodě. Podle iontového složení lze předpokládat, že dochází ke styku vody s kalcitem a sádrovcem. Koncentrace Fe a Al je velmi nízká s výjimkou srpna, kdy dochází k výraznému zvýšení obsahu těchto kovů. Koncentrace Fe stoupá z 10 mg l<sup>-1</sup> na 52 mg l<sup>-1</sup> a Al z 1,2 mg l<sup>-1</sup> na 64 mg l<sup>-1</sup>. Podobnou situaci lze pozorovat i u Zn<sup>2+</sup>, kdy v září jeho koncentrace stoupá z 2,6 μg l<sup>-1</sup> na 19,8 μg l<sup>-1</sup>. Náhlé změny koncentrace těchto prvků jsou pravděpodobně způsobené průmyslovými vodami.

7) *ES1008*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>. Voda v prameni ES1008 obsahuje vysoký poměr rozpuštěných látek a její průměrná konduktivita je 348,6 μS cm<sup>-1</sup>. Má neutrální pH (7,55). Vysoký podíl Ca<sup>2+</sup> (86,7 mg l<sup>-1</sup>) a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (261,7 mg l<sup>-1</sup>) signalizuje, že se voda nachází ve styku s vápencem. Koncentrace K<sup>+</sup> (44,7 mg l<sup>-1</sup>) a Cl<sup>-</sup> (14,84 mg l<sup>-1</sup>) může být způsobena přítomností draselné soli v podloží. Nadprůměrná koncentrace dusičnanů (65,34 mg l<sup>-1</sup>) poukazuje na možnou kontaminaci pramene vodami ze zemědělství.

8) *ES1009*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>. Pramen ES1009 je velmi podobný prameni ES1008, má vysokou konduktivitu (563,9 μS cm<sup>-1</sup>) a neutrální hodnotu pH (7,55). Vysoký obsah Ca<sup>2+</sup> (91,46 mg l<sup>-1</sup>) a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (235,48 mg l<sup>-1</sup>) naznačuje interakci vody s vápencem. Na rozdíl od ES1008 nemá tento pramen významné hodnoty koncentrace K<sup>+</sup> (6,5) a Cl<sup>-</sup> (6,2 mg l<sup>-1</sup>), což znamená, že u vod tohoto pramene nedochází ke styku s draselnou solí. Koncentrace dusičnanů je menší než v ES1008, nicméně je vysoká (36,7 mg l<sup>-1</sup>). Oba prameny mají nízký obsah těžkých kovů.

9) *ES1014*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>-Cl-SO<sub>4</sub>. ES 1014 je pramen s vysokou koncentrací Ca<sup>2+</sup> (39,2 mg l<sup>-1</sup>), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (80,9 mg l<sup>-1</sup>) a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (29,4 mg l<sup>-1</sup>), což je typické pro podzemní vodu ve styku s kalcitem a sádrovcem. Průměrný obsah Na<sup>+</sup> je 4 mg l<sup>-1</sup> a Cl<sup>-</sup> je 9,2 mg l<sup>-1</sup>, nicméně pravděpodobně dochází ke kontaminaci splaškovými vodami z dopravních komunikací. V květnu dosáhla koncentrace Na<sup>+</sup> hodnoty 34,9 mg l<sup>-1</sup> a Cl<sup>-</sup> 80,8 mg l<sup>-1</sup> a říjnu stoupl obsah Na<sup>+</sup> na 22,6 mg l<sup>-1</sup> a Cl<sup>-</sup> na 58,8 mg l<sup>-1</sup>. Obsah Fe se pohybuje v rozmezí 2,5 až 56 mg l<sup>-1</sup>. Průměrná koncentrace Al (0,9 mg l<sup>-1</sup>) je nejnižší ze všech zkoumaných pramenů, avšak je vyšší než přírodní

pozadí podzemních vod, která dle Pittera (2015) nepřekračuje 0,1mg l<sup>-1</sup>. Obsah dusičnanů se pohybuje mezi 9,5 mg l<sup>-1</sup> a 22,9 mg l<sup>-1</sup> a naznačuje kontaminaci pramenu odpadními vodami ze zemědělství.

## 6.2 Prameny krystalinika

1) *DN1010*: Voda je chemického typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>. Jde o pramen s neutrální hodnotou pH (7,8) a poměrně nízkou konduktivitou (275 μS cm<sup>-1</sup>). Vysoký obsah Ca<sup>2+</sup> (26,6 mg l<sup>-1</sup>) a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (143,5 mg l<sup>-1</sup>) a zároveň vysoká koncentrace Mg<sup>2+</sup> (13,5 mg l<sup>-1</sup>) naznačuje horninu s vysokým podílem karbonátových minerálů, pravděpodobně dolomitu. V této oblasti se skutečně nacházejí krystalické vápence s lokálními krasovými jevy. Průměrný obsah Fe je 19 mg l<sup>-1</sup> a Al 1 mg l<sup>-1</sup>. Obsah Si (4,3 mg l<sup>-1</sup>) poukazuje na vysoký podíl zrn slíd a živců v hornině.

2) *EN1002*: Voda je chemického typu Na-Ca-Cl-HCO<sub>3</sub>. Jde o pramen s vysokou konduktivitou (629,4 μS cm<sup>-1</sup>) a zásaditým pH (11,8). Nachází se na urbanizovaném území a má stálou vysokou koncentraci Na<sup>+</sup> a Cl<sup>-</sup>. Koncentrace Na se pohybuje mezi 42,7 mg l<sup>-1</sup> a 82 mg l<sup>-1</sup>. Koncentrace Cl<sup>-</sup> se pohybuje v rozmezí 48,5 až 143 mg l<sup>-1</sup>. Zasolení vody je pravděpodobně způsobeno blízkostí dopravních komunikací. Obsah Fe a Al se v průběhu vzorkování velice měnil. Koncentrace Fe nabývala hodnot od 2,5 mg l<sup>-1</sup> do 56 mg l<sup>-1</sup> a Al od 1,2 mg l<sup>-1</sup> do 36 mg l<sup>-1</sup>. Průměrná koncentrace dusičnanu je 19,9 mg l<sup>-1</sup>.

3) *EN1004*: Voda je chemického typu Na-Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>. Pramen má zásadité pH (8,4) a nejnižší konduktivitu (92,96 μS cm<sup>-1</sup>) ze všech zkoumaných pramenů. Převládající Na<sup>+</sup> nad Ca<sup>2+</sup> a nízká koncentrace HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (17,2 mg l<sup>-1</sup>) poukazují na podloží z magmatických hornin. Těžké kovy dosahují jen stopového množství, avšak koncentrace Al je stále vysoká a její průměr se rovna 138,4 mg l<sup>-1</sup>. Průměrná koncentrace Fe je 15,3 mg l<sup>-1</sup>.

4) *EN1005*: Voda je chemického typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Pramen vykazuje neutrální pH (7,67) a poměrně nízkou konduktivitu (293 μS cm<sup>-1</sup>). Koncentrace Ca<sup>2+</sup> (42,9 mg l<sup>-1</sup>), Mg<sup>2+</sup> (9,67 mg l<sup>-1</sup>) a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (132,23 mg l<sup>-1</sup>) ukazují na možný kontakt vody s dolomitem. Vysoký podíl SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (41,98 mg l<sup>-1</sup>) vypovídá o styku vody se sádrovcem nebo anhydritem. Průměrná koncentrace Fe je 17,25 mg l<sup>-1</sup> a Al je 1,2 mg l<sup>-1</sup>.

5) *EN1006*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Jde o pramen s typem charakteristickým pro podzemní vodu ve styku s dolomitem a sádrovcem. Má vysoký

obsah Fe (23,5 mg l<sup>-1</sup>) a poměrně vysoký, v porovnání s ostatními prameny, obsah Zn<sup>2+</sup> (2,18 µg l<sup>-1</sup>). Koncentrace rozpuštěných látek s výjimkou hlavních iontů je velmi nízká, což naznačuje relativně mělký oběh podzemní vody

6) *EN1011*: Voda je chemického typu Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Jde o pramen s vysokým obsahem Ca<sup>2+</sup> (55,58 mg l<sup>-1</sup>), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (166,44 mg l<sup>-1</sup>) a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (32,9 mg l<sup>-1</sup>), což je typické pro podzemní vody procházející vápencem a sádrovcem. Koncentrace dusičnanů je poměrně vysoká a rovná se 11,79 mg l<sup>-1</sup>.

7) *EN1015*: Voda je chemického typu Na-Ca-Cl. Pramen se nachází v centru Liberce na velmi urbanizovaném území. Má nejvyšší konduktivitu ze všech pozorovaných pramenů, která činí 930,9 µS cm<sup>-1</sup>. Nízká koncentrace HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (45,27 mg l<sup>-1</sup>) a zároveň vysoká koncentrace Mg<sup>2+</sup> (12,37 mg l<sup>-1</sup>) naznačují magmatickou horninu obsahující biotit. Pramen je zasolen, průměrná koncentrace Na<sup>+</sup> je 77,85 mg l<sup>-1</sup> a Cl<sup>-</sup> je 209,33 mg l<sup>-1</sup>. Kromě toho má vysokou koncentraci Cr<sup>III</sup> (4,67 µg l<sup>-1</sup>), Fe (15,67 mg l<sup>-1</sup>), Al (6,77 mg l<sup>-1</sup>) a dusičnanů (24,78 mg l<sup>-1</sup>), pravděpodobně antropogenního původu

8) *EN1021 a EN1022*: Vody chemických typů Na-Ca-Cl a Ca-Na-Cl-HCO<sub>3</sub>, představují velice podobné prameny s nízkou koncentrací HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Oba se nacházejí v blízkosti dopravní komunikace a jsou pravděpodobně kontaminované. EN1021 má obsah Na<sup>2+</sup> a Cl<sup>-</sup> několikrát vyšší než EN1022, což je z důvodu, že se nachází blízko k dopravní komunikaci. Pramen EN1022 je zatížen těžkými kovy Ni<sup>2+</sup> (10,08 µg l<sup>-1</sup>), Zn<sup>2+</sup> (28,25 µg l<sup>-1</sup>), Cd<sup>2+</sup> (1,89 µg l<sup>-1</sup>) a Al (117,97 mg l<sup>-1</sup>). V prameni EN1021 jsou také významné koncentrace Al (31,55 mg l<sup>-1</sup>), Ni<sup>2+</sup> (7 µg l<sup>-1</sup>) a Zn<sup>2+</sup> (6,75 µg l<sup>-1</sup>).

## 7 Diskuse

Zkoumané prameny se nacházejí na území zatíženém těžbou nerostných surovin s vysokou koncentrací urbanizovaných celků a jejich chemické složení je velice ovlivněno antropogenní činností.

Nejnižší průměrný podíl rozpuštěných látek (89,8 mg l<sup>-1</sup> až 169,2 mg l<sup>-1</sup>) má šest pramenů v lokalitě obcí Radvance (BS1016, BS1017) a Krompachu (BS1003, BS1018, BS1019, BS1027). Čtyři z nich se nacházejí na území CHKO Lužické hory (BS1003, BS1018, BS1019, BS1027). Vody těchto pramenů protékají svrchními vrstvami české křídly, kde je poměrně rychlá cirkulace vody. Nedochozí zde k dlouhodobému styku vody s horninou a důsledek je poměrně nízká mineralizace.

Nicméně, vysoký obsah hliníku, železa a síry ukazuje na přítomnost sádrovců, živců, slíd a jílových minerálů. Koncentrace chloridů a dusičnanů je očekávaně nízká, dokonce i pramen ve městě Radvanec obsahuje poměrně nízké hodnoty těchto prvků. Zajímavé je, že pramen v blízkosti vyvýšenin vulkanitů má hmotnostní koncentraci sodíku vyšší než koncentraci vápníku. Dominanci sodíku v tomto případě lze vysvětlit tím, že se meteorická voda dostává do rajonu vulkanitů, pak odtéká do nížin křídý a styk vody s karbonátovými sedimentárními horninami je poměrně krátký.

Další tři prameny (ES1008, ES1009, ES1014) rajonu křídý a kvartéru se nacházejí poblíž Českého Dubu. Vysoký obsah hydrogenuhličitanu svědčí o přítomnosti kalcitu. Zároveň byl pozorován litogenní vliv sylvínu. Bez ohledu na to, že se v blízkosti nachází několik uranových ložisek, mají tyto prameny, v porovnání s ostatními, nízký obsah hliníku. Koncentrace síry a železa se příliš neliší od ostatních pramenů a svědčí o přítomnosti pyritu. U dvou pramenů v lokalitě zemědělských ploch byla pozorovaná významná koncentrace dusičnanů.

V rajonu krystalinika je největší podíl pramenů, ve kterých přesahují hmotnostní koncentrace sodíku nad vápníkem (EN1002, EN1004, EN1015, EN1020, EN1021). Tato situace mj. nastává, protože se prameny nacházejí v urbanizované lokalitě Liberce a často zde dochází k znečištění pramenů splaškovými vodami. Většina pramenů se vyskytuje na podloží z magmatických (EN1002, EN1004, EN1015, EN1020) a metamorfních hornin (EN1005, EN1006, EN1021, EN1022), a proto mají vody těchto pramenů nízký obsah hydrogenuhličitanů a vápníku.

Na celém zkoumaném území jsou prameny s vysokou koncentrací síry, železa a hliníku. Jejich obsah ve vodě nesouvisí s geologickými rajony a je pravděpodobně způsoben interakcí vody s jílovitými a pyritickými břidlicemi. Vysoký obsah síry je pro tuto oblast příznačný a byl pozorován i v minulých hydrochemických výzkumech této oblasti (Zdeněk et al., 1989).

Dle Jetela (1989) jsou převládajícím typem vody na území krystalinika Ca-HCO<sub>3</sub> u pramenů v metamorfovaných horninách a Ca-SO<sub>4</sub> u pramenů v žule (Zdeněk et al., 1989). Avšak u zkoumaných pramenů v žule je dominantním iontem sodík, což potvrzuje myšlenku o možném znečištění těchto pramenů splaškovými vodami. Koncentrace chloru se v nekontaminovaných pramenech značně neliší od hodnot z roku 1989 a poukazuje na to, že voda pramenů prochází podpovrchovou vrstvou, má mělký oběh a je současného srážkového původu (Zdeněk et al., 1989).

## 8 Závěr

Na území Lužických hor vyskytují značné zásoby podzemní vody, které slouží k zajištění pitnou vodou obyvatelstva okolí. Podle dosažených výsledků je zřetelné, že voda všech pramenů prochází přípovrchovou zónou. To znamená, že vydanost pramenů je přímo závislá na počtu spadlých srážek a v době sucha může dojít ke značnému poklesu hladiny podzemní vody a vydatností pramenů. Z toho plyne nutnost meteorologického monitoringu daného území.

Některé z pramenů jsou významné pro turistiku a jsou využívány jako zdroje pitné vody, nicméně některé z nich mají zvýšené koncentrace těžkých kovů a hliníku. U pramenů v blízkosti sídel byl pozorován závažný vliv antropogenní činnosti.

Výsledky práce navazují na hydrologický výzkum v roce 2014 (GRACE) a doplňují ho o hydrochemická data, která v předchozích pracích byla poměrně málo hodnocena. Spolu tvoří kompletní přehled o současném stavu podzemních vod v oblastech Lužických hor.

## 9 Použitá literatura

- 1 BRENDENBERGER H., MARTIN P., BRUNKE M., JÜRGEN H., 2015: *Limnologie aktuell b. 14. Grundwassergeprägte Lebensräume. Eine Übersicht über Grundwasser, Quellen, das hyporheische Interstitial und weitere grundwassergeprägte Habitate*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 50 p.
- 2 BREZONIK P. L., ARNOLD W. A., 2011: *Water chemistry*. Oxford university press, New York.
- 3 BUMERL M., 2003: *Hydrologie*. Střední odborná škola ekologická a potravinářská. Veselí nad Lužnicí, online: [http://www.sos-veseli.cz/download/hydrologie\\_ucebni%20\\_text.pdf](http://www.sos-veseli.cz/download/hydrologie_ucebni%20_text.pdf), cit. 8. 7. 2016.
- 4 DAANSGAARD W. 1964: *Stable isotopes in precipitation*. Tellus, 16, 436-468 p.
- 5 DAVIE T., 2008: *Fundamentals of hydrology*. Taylor & Francis e-Library, New York: 221 p.
- 6 DOBRZYŃSKI D., 2006: *Silicon and aluminium in groundwater of the Klodzko Region (the Sudetes, SW Poland) -- partial geochemical equilibrium with secondary solid phase*. *Geological Quarterly* 50, 3: 369-382.



- 7 FICTUM V., 1980: *Hydrologie a hydraulika*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha: 180 s.
- 8 GEYH M., D'AMORE F., PACES T., PANG Z., ŠILAR J., 2000: *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Volume 4*. Unesco, Paris, online: [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\\_resources\\_publication\\_hydroCycle\\_en.html](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_publication_hydroCycle_en.html), cit. 9. 7. 2016.
- 9 GRAY N., 2010: *Water technology*. Elsevier, Oxford: 747 p.
- 10 HEINTZ A., 1993: *Chemie a životní prostředí*. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha: 382 s.
- 11 HERČÍK M., 2006: *Životní prostředí. Základy environmentalistiky*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava: 150 s.
- 12 HRUŠKA J., KRÁM P., 1994: *Aluminium chemistry of the root zone of forest soil affected by acid deposition at the Lysina catchment, Czech Republic. Ecological Engineering 3*: 5-16.
- 13 CHLUPÁČ I., (2002): *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha.
- 14 CHYTRÝ M., KUČERA T., KOČÍ M., GRULICH V., LUSTIK P. (eds) (2010): *Katalog biotopů České republiky*. Ed. 2. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha.
- 15 JACOBS D. G., 1968: *Sources of tritium and its behavior upon release to environment*. United States Government Research Reports, Springfield.
- 16 KALINOVÁ M., ECKHARD P., MARTÍNKOVÁ., ŠIMEK P., BÍLÝ M., KOUBKOVÁ L., BÖHM A., BÖRKE P., SCHULZ C., 2014: *Zdroje podzemních vod na česko-saském pomezí*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka v.v.i, Praha: 93 s.
- 17 KOPP R., 2015: *Hydrochemie pro rybaře*. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- 18 LOUČKA T., 2014: *Chemie životního prostředí*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Ústí nad Labem, online:
- 19 [http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/20e\\_final\\_tisk.pdf](http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/20e_final_tisk.pdf) cit. 8. 7. 2016.
- 20 MALOSZEWSKI P., ZUBER A., 1996: *Manual on mathematical models in isotope hydrology*. IAEA-TECDOC-910, Austria.

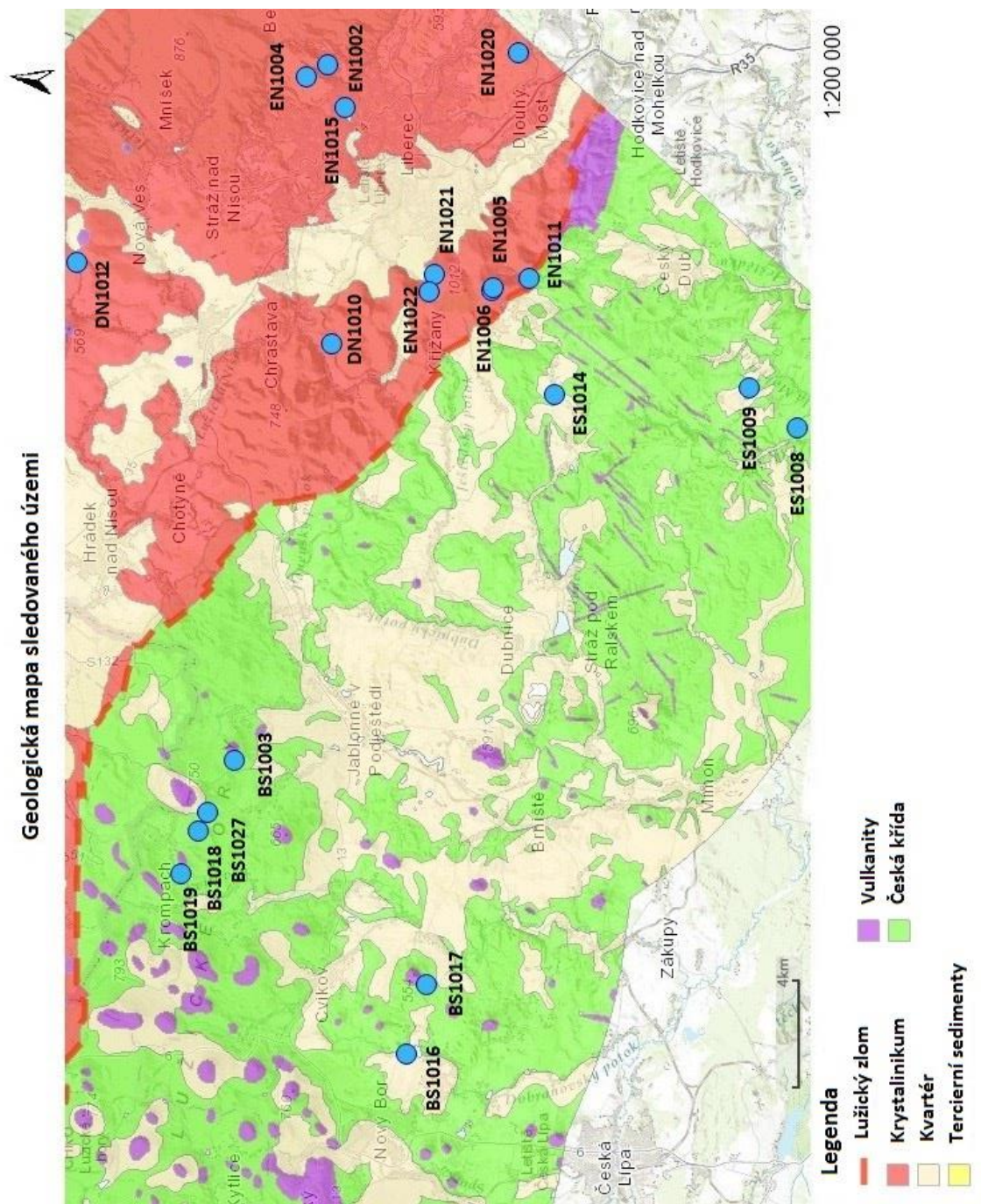
- 21 MANDEL S., SHIFTAN Z. L. 1981: *Groundwater resources*. Academic press, London: 269 p.
- 22 MARTIN L. J., 2013: *Hydro-environmental analysis*. CRC press, Boca Raton: 547 p.
- 23 MARTOŇ J., TÖLGYESSY J., HYÁNEK L., PIATRIK M., 1984: *Získavanie, úprava, čistenie a ochrana vod*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava.
- 24 MAZOR E., 2004: *Chemical and isotopic groundwater hydrology*. Marcel Dekker Publisher. New York: 451 p.
- 25 MICKIEWICZ A., MARSZALEK H., 2016: *Groundwater geochemical evolution under the influence of polymetallic deposit in Czarnów*. Environmental Earth Sciences.
- 26 MÍŠTĚRA L., (1985): *Geografie Československé socialistické republiky*. Statní pedagogické nakladatelství, Praha.
- 27 NERUDA M. [ed.], 2014: *Management podzemních vod*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Ústí nad Labem: 113 s.
- 28 PAČES T., 1982: *Základy geochemie vod*. Academia, Praha: 304 s.
- 29 PAČES T., 2009: *Úvod do hydrogeochemie*. Technická univerzita v Liberci. Praha-Liberec, online: [http://artec.tul.cz/?content=upload/%C3%9Avod\\_do\\_Hydrogeochemie\\_skripta\\_TUL.2009-07-13.15-08-37.pdf&lang=cs](http://artec.tul.cz/?content=upload/%C3%9Avod_do_Hydrogeochemie_skripta_TUL.2009-07-13.15-08-37.pdf&lang=cs), cit. 8. 7. 2016.
- 30 PAČES T., 2011: *Úvod do hydrogeochemie*. Technická univerzita v Liberci, Liberec: 80 s.
- 31 PAVELKOVÁ R., FRAJER J., 2012: *Základy fyzické geografie 1 - hydrologie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, online: BE
- 32 PELIKÁN V., 1983: *Ochrana podzemních vod*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha: 324 s.
- 33 PELIKÁN V., 1988: *Hydrologická měření*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha: 224 S.
- 34 PITTEP P., 2015: *Hydrochemie*. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha: 792 s.
- 35 RÉTHÁTI L., 1983: *Groundwater in civil engineering*. Akadémiai Kiadó, Budapest: 478 p.

- 36 SEDMIDUBSKÝ D., FLERM V., SVOBODA J., CIBULKA R., 2011: *Chemie pro bakaláře*. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha.
- 37 STARÝ M., 2005: *Hydrologie*. Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- 38 ŠTĚRBA O., 1986: *Pramen života*. Panorama, Praha: 224 s.
- 39 TÓLGYESSY J., 1984: *Chémia, biológia a toxikológia vody a ovzdušia*. Veda, Bratislava: 531 s.
- 40 TOURKOVÁ J., 1996: *Hydrogeologie*. České vysoké učení v Praze. Praha.
- 41 WINID B., 2015: *Bromine and water quality – Selected aspects and future perspectives*. *Applied Geochemistry* 63: 413–435.
- 42 ZDENĚK V., CHALOUPSKÝ J., ČERVENKA J., JETEL J., KRÁLÍK F., LÍBALOVÁ J., PÍCHOVÁ E., POKORNÝ J., POŠMOURNÝ K., JOSEF S., SHRBNÝ O., ŠALANSKÝ K., ŠRÁMEK., VÁCI J., 1989: *Geologie Krkonoš a Jizerských hor*. Ústřední ústav geologický. Praha: 288 s.
- 43 ZELINKA Z., 2003: *Stavíme studny*. ERA, Brno.
- 44 ŽÁČEK L., 1981: *Chemické a technologické procesy úpravy vody*. Nakladatelství technické literatury, Praha: 272 s.

### Internetové zdroje

- 45 ČHMÚ, 2016: Český hydrometeorologický ústav, online: <http://portal.chmi.cz>, cit. 2.12.2016
- 46 eAGRI, 2016: Ministerstvo zemědělství, *Situační a výhledová zpráva: půda*, online: [http://eagri.cz/public/web/file/442693/SVZ\\_Puda\\_2015.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/442693/SVZ_Puda_2015.pdf), cit. 2.12.2016
- 47 Liberecký kraj, 2009: *Aktualizace Regionální surovinové politiky Libereckého kraje*, online: [http://www.raspenava.cz/deska\\_10/oznameni\\_100111\\_100210.pdf](http://www.raspenava.cz/deska_10/oznameni_100111_100210.pdf), cit. 12.01.2016.

## 10 Přílohy



Mapa 1. Geologická mapa zkoumaných pramenů (arcgis.com, projekt „prameny spojují krajiny a státy“, 2017)

Lokalita	Petrovice bunkr	Radvanec	Maxov 6	Krompach 1	Krompach 2	CZ Wasserfall	Vápno	Lesnovek	pramen Ploučnice
Zdroj	BS1003	BS1016	BS1017	BS1018	BS1019	BS1027	ES1008	ES1009	ES1014
Hornina	Křemenný pískovec	Křemenný pískovec	Křemenný pískovec	Křemenný pískovec	Křemenný pískovec	Křemenný pískovec	Pískovec	Pískovec	Křemenný pískovec
Chemický typ	Ca-Mg-HCO3-SO4	HCO3-SO4	Na-Ca-SO4-HCO3	Ca-HCO3-SO4	Ca-HCO3	Ca-HCO3-SO4	Ca-HCO3	Ca-HCO3	Ca-HCO3-Cl-SO4
Typ pramenu	reokren	reokren	limnokren	limnokren	reokren	r/l	limnokren	reokren	heleokren
Teplota (°C)	7	8,9	8,6	7,9	8,3	7	9,2	9,2	12,6
pH	3,89	5,64	6,51	6,26	7,12	6,6	7,55	7,55	7,27
Konduktivita[ms/m]	26,18	18,47	35,28	25,64	33,3	19,7	102,41	87,72	46
O <sub>2</sub> (mg/l)	8,8	11,2	11,7	11,25	16	7,8	11,62	11,81	9,62
Na <sup>+</sup> (mg/l)	4,7	5,18	20,06	1,9	2,34	4,19	12,74	4,34	12,25
K <sup>+</sup> (mg/l)	2,35	1,65	0,982	2,2	0,99	1,45	44,66	6,50	2,72
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	13,2	11,92	19,8	24,35	38,93	16,48	86,70	91,46	39,23
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	4,9	3,72	2,46	2,9	0,68	1,49	3,32	1,39	2,93
Cl (mg/l)	3,18	5,49	5,416	2,64	2,63	3,11	14,84	6,12	29,41
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	27,45	34,02	25,08	57,95	101,67	41,53	261,66	235,48	80,88
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	41,45	22,85	60,9	37,10	16,60	24,31	33,74	33,30	26,62
NO <sub>3</sub> (mg/l)	11,14	4,99	16,86	2,12	5,34	9,08	65,34	36,70	12,88
Pb <sup>2+</sup> (µg/l)	0,75	0,02	0,108	0,06	0,06	0,03	0,04	0,02	0,05
Cu <sup>2+</sup> (µg/l)	1,15	0,31	0,512	0,24	0,59	0,16	1,82	0,48	0,72
Al (mg/l)	880	3,10	9,36	5,90	3,43	8,94	1,20	1,50	0,90
Cr <sup>III</sup> (µg/l)	1,085	0,37	0,388	0,55	0,20	0,24	0,78	0,66	0,75
Ni <sup>2+</sup> (µg/l)	15,95	15,95	0,848	5,30	1,73	2,88	3,52	3,34	2,00
Zn <sup>2+</sup> (µg/l)	34,15	2,98	1,85	2,90	1,57	4,99	0,43	0,33	2,05
Cd <sup>2+</sup> (µg/l)	0,32	0,01	0,0072	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01
Fe (mg/l)	341,5	14,25	53,5	13,50	38,5	17,75	19,60	20,80	22,67
Si (mg/l)	8	3,42	6,6	3,35	3,51	3,12	4,08	3,52	3,8
Σp celková miner.	108,4	89,8	151,6	131,2	169,2	101,6	523	415,3	206,9

Tab. 1. Chemická analýza pramenů křídý a kvartéru, hodnoty konduktivity jsou uvedené pro 25 °C podle ČSN EN 27888 (75 7344).

Lokalita	Karlové bučiny	Ulice Jizerská	Skautská studánka	Frantina studánka	pramen Lesních panen	Svěcinka	U přehrady	Milíře	Ostašovský potok	Přítok
Zdroj	DN1010	EN1002	EN1004	EN1005	EN1006	EN1011	EN1015	EN1020	EN1022	EN1021
Hornina	Vápenec, dolomity	Biotická žula, porfýr	Biotická žula, porfýr	Sericitní kvarcit, metaconglomerát	Sericitní kvarcit, metaconglomerát	Vápenec Ca-HCO3-	Biotická žula, porfýr	Muskovito-biotická žula	Sericitní kvarcit, metaconglomerát	Sericitní kvarcit, metaconglomerát
Chemický typ	Ca-Mg-HCO3	Na-Ca-Cl-HCO3	Na-Ca-Mg-HCO3-SO4	Ca-Mg-HCO3-SO4	Ca-HCO3-SO4	SO4	Na-Ca-Cl	Na-Ca-HCO3-SO4	Ca-Na-Cl-HCO3	Na-Ca-Cl
Typ pramenu	reokren	heleokren	reokren	reokren	reokren	reokren	-	limnokren	reokren	heleokren
Teplota (°C)	7,8	11,8	8,4	6,5	6,6	8,8	10,3	8,1	6,4	12,7
pH	7,9	6,57	5,66	7,67	7,99	8,03	6,23	4,73	6,16	7,35
Konduktivita[ms/m]	41,47	85,22	14,02	45,44	31,18	136,56	132,93	19,68	50,27	66,15
O <sub>2</sub> (mg/l)	11,3	6,55	9,85	7,67	9,57	10,51	10,51	8,67	9,49	9,52
Na <sup>+</sup> (mg/l)	2,27	62,12	4,06	1,55	1,03	2,06	77,85	6	15,55	50,85
K <sup>+</sup> (mg/l)	1,30	3,98	0,84	0,38	0,53	0,39	3,85	2	0,61	1,32
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	26,63	22,95	7,54	42,90	30,50	55,58	64,38	11,2	24,22	15,4
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	13,53	3,93	2,15	9,67	3,30	5,12	12,37	2,5	4,24	7,07
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	2,50	85,63	2,71	1,85	1,56	2,52	209,33	2,7	36,52	103,3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	143,53	58,93	17,19	132,23	83,55	166,44	45,27	18,3	56,37	30,5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	16,87	22,17	22,20	41,98	22,20	33,38	38,18	37,5	19,19	15,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	6,1	19,93	6,17	2,86	4,78	11,79	24,78	10,6	4,21	1,695
Pb <sup>2+</sup> (µg/l)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,10	0,08	0,03	0,18
Cu <sup>2+</sup> (µg/l)	0,15	1,46	0,29	0,10	0,18	0,11	1,06	0,9	4,17	0,795
Al (mg/l)	1,03	8,93	138,40	1,20	1,80	2,80	6,77	140	117,97	31,55
Cr <sup>III</sup> (µg/l)	0,40	2,43	0,28	0,25	0,19	0,46	4,18	0,09	0,99	2,1
Ni <sup>2+</sup> (µg/l)	0,87	1,05	1,22	1,67	1,60	1,72	3,67	1,2	10,08	7
Zn <sup>2+</sup> (µg/l)	1,07	2,24	2,02	0,63	2,18	0,75	4,67	49,8	28,25	6,75
Cd <sup>2+</sup> (µg/l)	0,003	0,01	0,1	0,004	0,06	1,20	0,07	0,3	1,34	0,06
Fe (mg/l)	19,00	25,25	15,30	17,25	23,50	14,90	15,67	2,5	15,50	21,75
Si (mg/l)	4,33	2,75	0,42	2,45	2,03	3,1	3,67	1	1,44	1,24
ΣP celková miner.	212,74	279,64	62,88	233,42	147,44	276,8	476,02	90,8	160,91	225,64

Tab. 2. Chemická analýza pramenů kristalinika, hodnoty konduktivity jsou uvedené pro 25 °C podle ČSN EN 27888 (75 7344).