

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Ondřej Sysel

Reakce granitu s termální vodou a vliv na propustnost

Reaction of granite with termal water and changes in permeability

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

Praha, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 14. 8. 2017

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu mé bakalářské práce doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za jeho ochotu a pomoc. Dále bych chtěl velmi poděkovat Mgr. Michalu Filippimu, PhD. za pomoc a kritické připomínky k textu práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá reakcí vody s granitem. Byly popsány základní vlivy, které řídí a ovlivňují zvětrávání granitů. Jako významný se ukazuje vliv teploty na rozpouštění minerálů. Zatímco při nižších teplotách, se rozpouštění omezuje pouze na živce, při vyšších teplotách dochází k rozpouštění i odolnějších minerálů jako je například křemen, biotit či muskovit. Přítomnost rozpuštěného CO_2 může ovlivňovat jak rozpouštění, tak i srážení minerálů. Z rešerše také vyplynulo, že proudění vody v granitech se omezuje na zlomy a pukliny, které však mohou být postupem času vlivem zvětrávání granitu vyplněny a utěsněny zejména jílovými minerály, které vznikají ve velkém množství rozkladem živců. V některých případech ale může docházet také k opačnému jevu, když na zlomech dochází ke tvorbě silně propustných kanálů. Kromě rešerše literatury byla také provedena mineralogická analýza nerozpustného rezidua získaného rozpuštěním aragonitového sintru z Vřídelního pramene. Pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) a práškové rentgenové difrakce (RTG) byl identifikován velmi hojný křemen, dále pak živce, slídy a jílové minerály, oxidy a oxihydroxidy železa a v menší míře baryt, magnetit a další minerály. Ve většině případů (křemen, živce, slídy a jílové minerály) jde s nejvyšší pravděpodobností o relikty granitu vynesené k povrchu vystupující termální vodou. Dobře krystalizovaný baryt a oxihydroxidy železa se patrně srážely z roztoků spolu s vřídlovcem. Magnetit a případně další minerály snad ukazují na další horninové zdroje.

Abstract

The purpose of this thesis is to characterize the reaction of water with granite by describing the main factors, which control the weathering of granite. The effect of temperature on the dissolution of minerals turns to be the most significant. While the dissolution of feldspars occurs at lower temperatures, more resistant minerals such as quartz, biotite or muscovite are dissolved as well at higher temperatures. The presence of dissolved CO₂ affects dissolution as well as precipitation of minerals. The research done in this thesis also reveals that flowing of water in granite is limited only to joints and fractures, which can be filled by the clay minerals originated from the weathering of feldspars. In some cases, an opposite phenomenon may occur when highly permeable channels start to grow on faults. Mineralogical analysis of the insoluble residue obtained by dissolving aragonite sinter from spring Vřídlo in Karlovy Vary was performed. Abundance of quartz in, feldspar, mica, clay minerals, oxides and hydroxides of iron and to a lesser extent, baryte, magnetite and other minerals were identified by scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Powder Diffraction (XRD). In most cases, it may be assumed that these relics of granite were carried out to the surface by thermal water. The well-crystallized baryte and iron oxyhydroxides may have precipitated from the solutions together with the sinter. Magnetite and potentially other minerals may imply additional rock sources.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	ZÁKLADNÍ MECHANISMY ZVĚTRÁVÁNÍ GRANITŮ V DŮSLEDKU PROUDĚNÍ TERMÁLNÍCH VOD A JEJICH VLIV NA PROPUSTNOST HORNIN.....	8
2.1	TYPY POROZITY, PROPUSTNOSTI A VLNKOSTI HORNIN V KRYSTALINIKU	8
2.2	TRANSPORT LÁTEK A VODY NA ZLOMECH A V PUKLINÁCH	8
2.3	SEBEORGANIZACE TOKU V PORUŠENÝCH HORNINÁCH.....	9
2.4	ZVĚTRÁVÁNÍ GRANITU VE VODĚ.....	9
3	DISKUZE PUBLIKOVANÝCH POZNATKŮ.....	13
4	TEPLÉ PRAMENY V KARLOVÝCH VARECH	14
4.1	GEOLOGIE OBLASTI.....	14
4.2	KARLOVARSKÉ PRAMENY	16
4.3	ANALÝZA VŘÍDLOVCE	17
4.3.1	<i>Příprava vzorku</i>	<i>17</i>
4.3.2	<i>Mikroskopie</i>	<i>17</i>
4.3.3	<i>Skenovací elektronový mikroskop.....</i>	<i>18</i>
4.3.4	<i>Prášková rentgenová difrakce</i>	<i>20</i>
5	DISKUZE	22
6	ZÁVĚR	24
7	ZDROJE:.....	25

1 Úvod

V posledních dekádách se v České republice, ale i v mnoha dalších zemích řeší intenzivně otázka, kam bezpečně ukládat radioaktivní odpad z provozu jaderných elektráren. V této souvislosti probíhá mnoho typů výzkumů, které řeší tuto problematiku. Jako jeden z nejreálnějších způsobů se jeví vybudování úložiště hluboko v zemi, nejlépe ve skalním masívu. Je důležité, aby úložiště odolávalo vnějším vlivům po více než sto tisíc let, a proto se musíme zabývat nejen technologií výstavby, ale i horninovým prostředím, ve kterém bude úložiště vybudováno, neboť po tak dlouhé době zde může docházet k zvětrávání. Jednou z nejvhodnějších hornin z hlediska stability se jeví granit. Tato práce se proto zaměřuje na reakci granitu s vodou.

V minulosti bylo provedeno mnoho studií, zabývajících se reakcí vody s granitoidními horninami. Studie byly prováděny v laboratorních podmínkách, ale také přímo v terénu. Výzkumy se zaměřovaly na odlišné cíle a byly prováděny za různých podmínek, proto výsledky jednotlivých výzkumů mohou být odlišné a těžko porovnatelné. Cílem této bakalářské práce je vytvořit souhrn poznatků týkajících se především reakce granitu s termálními vodami a také posoudit vliv těchto reakcí na proudění vody. Dále jsou tyto poznatky dány do kontextu s teplými prameny v Karlových Varech a doplněny o nové informace získané mineralogickou analýzou detritických úlomků vynesných z výstupních cest Vřídla a zachycený ve vřídlovci v Karlových Varech.

V první části práce budou popsány základní faktory týkající se proudění vody v granitech a jejich vzájemné reakce. Dále budou porovnány výsledky doposud provedených studií. V další části se zaměřím na oblast Karlových Varů, neboť karlovarské teplé prameny vyvěrají z granitového podloží a jsou tak reprezentativním místem námi pozorovaných jevů. Z Vřídla (hlavního pramene Karlových Varů) jsem získal vřídlovec, který se vysrážel na stěnách potrubí v oblasti separace CO₂. U vzorku jsem se zaměřil na mineralogický rozbor detritických úlomků ve vřídlovci, neboť detailní znalost mineralogického složení může poskytnout informace o vlastnostech vody vyvěrající z hloubky a zvětrávání minerálů.

2 Základní mechanismy zvětrávání granitů v důsledku proudění termálních vod a jejich vliv na propustnost hornin

2.1 Typy porozity, propustnosti a vlhkosti hornin v krystaliniku

Proudění podzemní vody je důležité jak pro rozpouštění minerálů, tak i pro zajištění transportu iontů na místo jejich případného srážení (Bons, 2000). Pro krystalické horniny platí, že významnější proudění probíhá pouze v trhlinách. Matrix horniny však není nepropustná a převážná část vody v systému je obsažena v matrix (Black, 1987). Lze tak propustnost v krystaliniku rozdělit na puklinovou a matricovou (propustnost matrix). Obvykle bývá puklinová propustnost o několik řádů větší a při běžných terénních zkouškách je propustnost matrix zanedbatelná. Propustnost matrix je nejlépe měřitelná laboratorními testy a za použití vhodného neporušeného vzorku, u kterého bude puklinová propustnost eliminována. Studie J. H. Blacka ukázala, že při měření na vrtech je hydraulická vodivost v neporušené hornině kolem $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ a v porušených horninách až $1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ (Black, 1987). Z toho lze usoudit, že pro proudění vody v horninovém prostředí bude podstatná přítomnost puklin a zlomů. Rychlost proudění vody v těchto zlomech a puklinách bývá ovlivněna geometrií, četností a hydraulickými vlastnostmi poruch (Grant 2011). Pukliny jsou mechanické diskontinuity v horninách. Je možné rozlišovat pukliny primární a sekundární. Primární pukliny jsou spojeny s objemovými změnami, které jsou způsobeny především chladnutím magmatických těles. Takovéto pukliny bývají relativně rovnoměrně rozloženy v celém objemu. Sekundární pukliny bývají spojeny především s pozdějšími tektonickými pohyby. V důsledku soustředění napětí se mohou tvořit silně porušené zóny. Tyto zóny tvoří často složitou a velmi propustnou síť zlomů a puklin.

2.2 Transport látek a vody na zlomech a v puklinách

Difúze a advekce jsou dva základní pohyby kapalin a rozpuštěných látek na zlomech. Důležitost advekce (definovaná rychlostí toku tekutiny, v) vzhledem k difúzi, (definovaná efektivním koeficientem difúze D) je obvykle vyjádřena Pécletovým číslem (Pe) (Bear, 1972):

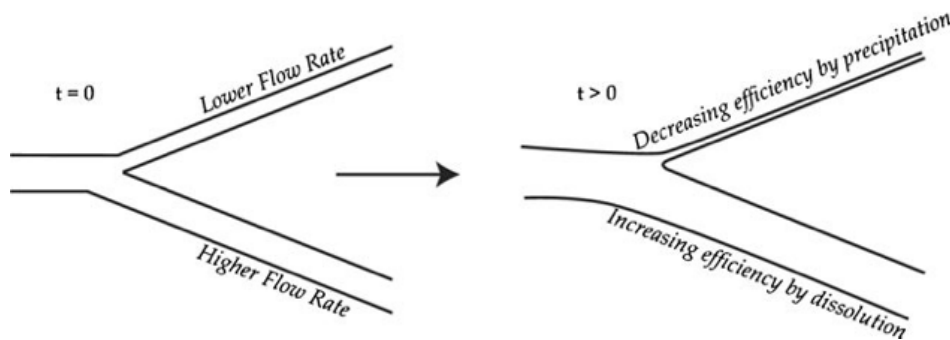
$$Pe = \frac{vL}{D}$$

Kde L je charakteristická délka, jako je velikost zrna v porézním zrnitém materiálu. Difúze dominuje, když Pe se blíží k nule, zatímco advekce dominuje při větším Pe (přibližně nad deset) (Bons, 2012).

Difúze je účinná pouze na malé vzdálenosti a k vyvinutí pohybu je třeba rozdíl v koncentraci látky mezi dvěma body. Mineralogie nebo povrchová energie mohou také způsobit podobnou chemickou nerovnováhu. Advekce je poháněná hydraulickým gradientem a je obvykle mnohem účinnější než difúzní transport. Je schopna přenášet tekutiny na větší vzdálenost, ale pouze za předpokladu, že se jedná o otevřený prostor. (Bons, 2012). Vzhledem k zaměření na termální prameny, je třeba zmínit také vliv teploty, neboť transport tepla vždy doprovází transport látek. Teplota výrazně přispívá ke změnám fyzikálně-chemických parametrů termálních systémů a tím umocňuje zvětrávání, transport a srážení minerálů (Azaroual, 1997).

2.3 Sebeorganizace toku v porušených horninách

V silně porušených horninách se mohou tvořit složité a různě propojené sítě puklin. V případě jisté vyváženosti toku tak může docházet k sebeorganizaci, tedy k samovolnému usměrnění a uspořádání toku v hornině (Ortoleva, 1987). Když jsou v hornině například dvě paralelní propustné pukliny, kterými proudí voda, v méně propustné puklině může docházet k akumulaci materiálu ze zvětrávání hornin, což povede ke snížení propustnosti, a nakonec i k úplnému ucpání. V propustnější puklině bude naopak docházet k rozšiřování vlivem odnosu horninového materiálu (obr. 1). Nakonec se takto zachovávají pouze silně propustné kanály, které mohou být i desítky centimetrů široké a stovky metrů dlouhé (Mayo, 2014).



Obr. 1. Schematický diagram sebeorganizace znázorňující změny propustnosti v čase (Mayo, 2014).

2.4 Zvětrávání granitu ve vodě

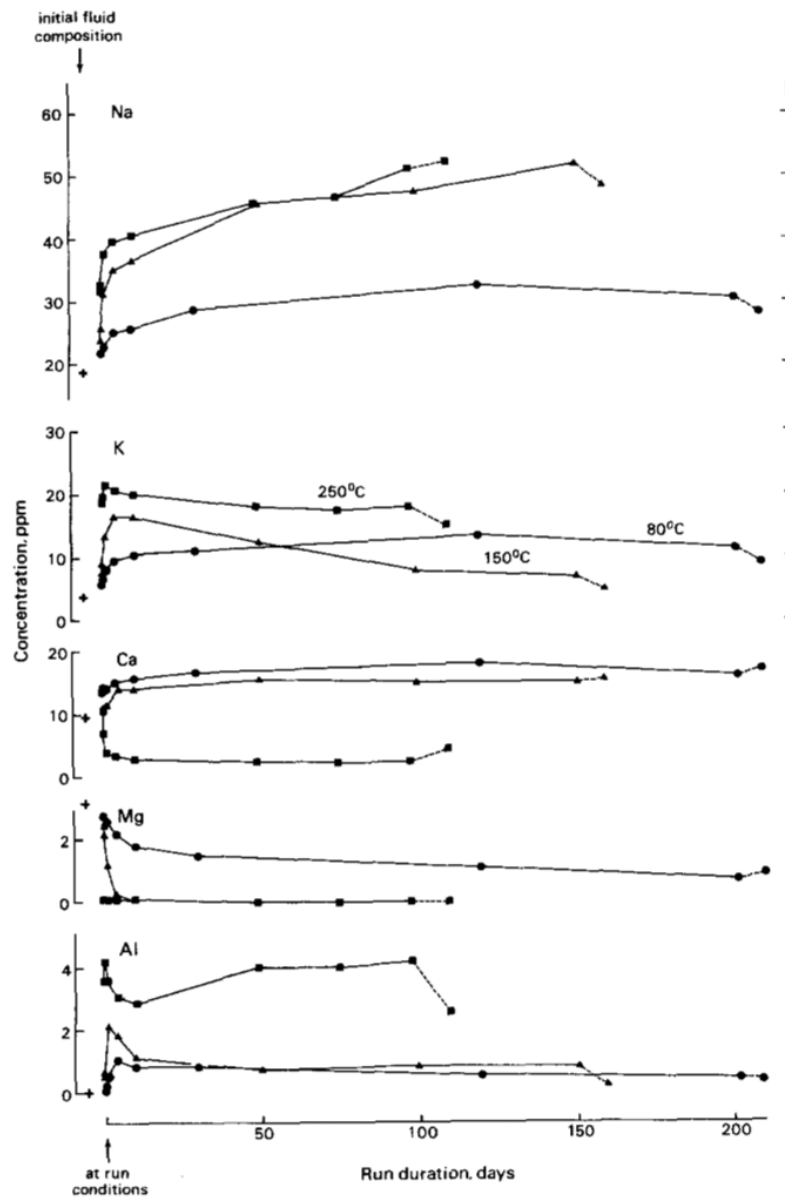
Zde budou stručně shrnuty a interpretovány výsledky některých výzkumů, které nám pomohou pochopit procesy probíhající při proudění vody horninou.

Vzhledem k tomu, že většina horninotvorných minerálů byla vytvořena při vysokých teplotách a za vysokých tlaků, nejsou tyto minerály stabilní při nízkých teplotách a tlacích, které panují na zemském povrchu, zejména v přítomnosti H_2O , O_2 , CO_2 . Proto dochází k jejich zvětrávání. Krystalická hornina bývá tvořena z více minerálů, které mají rozdílné fyzikální i chemické vlastnosti, a proto i jejich chování při reakci s vodou se výrazně liší. Některé minerály se tak mohou zachovat a jiné se mohou zcela rozpustit. To, jak jednotlivé minerály budou odolné, nám do jisté míry může naznačit obrácené Bowenovo reakční schéma.

Granit jakožto světlá plutonická hornina se nachází v celé kontinentální kůře. Skládá se z hrubých zrn křemene, draselného živce a sodnovápenaté živce (plagioklasy). Tyto minerály tvoří více než 80 % horniny. Běžné, ale v menší míře zastoupené minerály, jsou muskovit a biotit, případně akcesorické minerály jako amfibol, apatit, ilmenit, turmalín, sulfidy, aj. Chemické složení žuly se v procentech pohybuje kolem 70–77 % oxidu křemičitého, 11–13 % oxidu hlinitého, 3–5% K_2O , 3–5% Na_2O , 1–2% CaO , 2 až 3 % celkového železa a méně než 1 % TiO_2 (Moore, 1981; Vylita et al., 1991, Savage, 1987).

David Savage provedl experiment, kdy nechal granit reagovat se zředěnou $Na-HCO_3-Cl$ vodou o celkové mineralizaci 0,12 g/l při teplotě 80, 150 a 250 °C a tlaku 50 MPa (Savage, 1987). Loužení bylo prováděno po dobu až 200 dnů. Výsledkem byla mírně alkalická voda (pH 7–8,5), nasycená křemenem a fluorem. Právě u křemene a fluoru lze pozorovat závislost

koncentrace na teplotě. U lithia a bromu je koncentrace větší při 250 °C. Zajímavější hodnoty jsou pro nás ale koncentrace Na, K, Ca, Mg a Al, které můžeme vidět na grafech (obr. 2.).



Obr. 2. Koncentrace Na, K, Ca, Mg a Al (v ppm) rozpuštěných ve vodě v průběhu času (Savage, 1987).

Z grafu je patrné, že koncentrace sodíku jsou nejmenší při 80 °C. Při 150 a 250 °C byly hodnoty podobné. U vápníku byly naměřeny podobné hodnoty při 80 a 150 °C. Při 250 °C byl pozorován poměrně rychlý pokles koncentrace, který byl pravděpodobně způsoben srážením sekundárních minerálů. Zajímavé hodnoty byly naměřeny u hořčíku. Zatímco při 80 °C koncentrace po celou dobu klesala pozvolna, při 150 °C koncentrace klesla velmi rychle prakticky na nulu. Při 250 °C se hodnoty držely na nule po celou dobu.

Protože zdrojem těchto kationtů jsou především živce a slídy, lze předpokládat že při 250 °C docházelo k výraznějšímu rozpouštění ortoklasu, anortitu a albitu, zatímco biotit a muskovit reagoval jen nepatrně. Malé známky rozpouštění pozorované na povrchu minerálů byly

pozorovány u křemene a turmalínu při 250 °C. Mezi nejběžnější sekundární minerál patřil smektit, který byl pozorován při všech teplotách. Dále byly pozorovány minerály laumontit (při 150 °C) a wairakit (při 250 °C). Srážení wairakitu bude pravděpodobně příčinou poklesu koncentrace Ca ve vodě. Při 250 °C byl přítomen anhydrit nebo sádrovec, které byly přítomny pouze v menší míře. Zdrojem lithia je pravděpodobně z 30 % biotit, 27 % muskovit, 6 % turmalín a zbytek připadá na jiné minerální fáze.

Interpretace reakcí granitu s vodou byla podle Savage taková, že při všech teplotách docházelo k rozpouštění plagioklasu a draselného živce a tvorbě K-Mg-Na smektitu s kalcitem. Při 250 °C pak docházelo k pomalému rozpouštění muskovitu a nebo biotitu s turmalínem (což naznačuje přítomnost lithia) a srážení wairakitu s anhydritem. Při 150 °C docházelo ke srážení laumontitu a opět nepatrnému rozpouštění muskovitu a nebo biotitu s turmalínem. Pro 80 °C byly významné pouze již zmíněné minerály, které se rozpouštěly a srážely při všech teplotách.

Dalším experimentem, který Savage prováděl, bylo rozpouštění granitu při 100 °C a 50 MPa po dobu 203 dní (Savage, 1987). Výsledky přibližně odpovídaly experimentu při 80 °C, kdy jediným významným sekundárním minerálem byl smektit.

Jiný experiment zaměřený také na reakci granitu s vodou provedl D. E. Moore (More, 1981). Ten uzavřel do válcové nádoby vzorek a do středu umístil topné těleso. Teploty na okraji válce tak dosahovaly 80–100 °C a v jeho středu, kde bylo umístěno topné těleso, dosahovala teplota 250–300 °C. Moore v pokusu nezkoumal jen reakce horniny, ale také změny propustnosti horniny. Výsledky měření propustnosti ukázaly výrazné snížení propustnosti u všech měřených vzorků již po několika dnech. Propustnost se snížila o 35–1,5 % oproti původním hodnotám. Příčina snižování propustnosti je vysvětlována rozdílem teplot mezi středem a vnějším okrajem válce, což vede k rozpouštění křemene při 295 °C a srážení při okraji. Koncentrace hliníku zde nebyly zkoumány, proto nelze zcela vyloučit vliv srážení jílových minerálů na propustnost. Nicméně pokud nějaké minerály přítomny jsou, tak jen v malém množství.

M. Azaroual zkoumal interakci granitu s destilovanou vodou při 180 °C a 1,4 MPa po dobu 38 dnů (Azaroual, 1997). Po dokončení experimentu byl pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) prohlížen povrch křemene, plagioklasu, draselného živce, biotitu a amfibolu a byly posuzovány stopy po jejich rozpouštění. U křemene byly pozorovány jen v malé míře leptové jamky, které indikují reakci s vodou. Proto lze předpokládat, že na celkovém obsahu rozpuštěného SiO₂ se bude podílet malým množstvím. Na povrchu amfibolu nebyly pozorované žádné stopy, proto lze předpokládat, že za daných podmínek nebyl příliš reaktivní. Na šupinkách biotitu byly viditelné stopy koroze podél dráhy toku vody, což naznačuje reakci s vodou. Na plagioklasu byla znatelná výrazná koroze povrchu a u draselného živce byla koroze ještě zřetelnější.

Jeong se zabýval vznikem a chemickým složením pramenů bohatých na CO₂ (Jeong, 2005). Výzkum Jeonga ukazuje, že prameny bohaté na CO₂ bývají v oblasti spojeny s výskytem hlubokých poruchových zón v mezozoických granitech. U těchto pramenů se teplota vody pohybovala v rozmezí od 10 do 30 °C. Naměřené pH vod bylo poměrně nízké, pohybovalo se mezi 4,8 a 6,76. Dále se ukázalo, že vody bohaté na CO₂ měly větší koncentrace iontů Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻ a F⁻ než vody bez CO₂. Tento rozdíl je interpretován tak, že vysoká koncentrace CO₂ ve vodě způsobuje významné snížení pH. To vede k růstu rozpustnosti a urychlení rozpouštění. Například vysoké koncentrace kationtů K⁺, Na⁺ a Ca²⁺ jsou vysvětlovány hydrolyzou živců podle následující chemické rovnice (1):



Z chemické reakce je patrné, že hydrolyzou živců se bude srážet kaolinit, a ve vodě budou rozpuštěny kationty K^+ , Na^+ a Ca^{2+} . Rozpuštěné kationty mohou dále reagovat a srážet sekundární minerály. Například vápník se za přítomnosti CO_2 může srážet jako kalcit.

V oblasti Soultz-sous-Forêts ve Francii se L. Griffiths zabýval hydrotermální výplní poruch v horninách (Griffiths, 2016). Zkoumanou oblast tvoří granitové podloží, které překrývá 1,4 km mocná vrstva sedimentů, zejména pískovců. Lokalita je významná svým geotermálním potenciálem, neboť již v prvním kilometru hloubky je teplota kolem 100 °C. Analýza vrtného jádra z hloubky až 2230 m odhalila rozsáhlou síť fraktur v granitech i nadložních sedimentech. Byly pozorovány jak otevřené, tak i uzavřené pukliny vyplněné křemenem, illitem, chloritem, kalcitem, dolomitem, barytem, pyritem a galenitem. Ukázalo se, že přítomnost illitu výrazně snižuje pórovou propustnost u pískovců v nadloží granitu, což vede k tomu, že voda proudí puklinami. Jíly se nacházely po celé délce výskytu pískovců a v nejnižších hloubkách tvořil illit až 20 % hmoty. Voda v této oblasti je velmi slaná s množstvím rozpuštěných látek kolem 100 g/l. Z takto nasycené vody se při ochlazení velmi rychle srážejí minerály. Jedním z často pozorovaných srážených minerálů je baryt. Vzhledem k rychlosti srážení barytu, která činí až několik milimetrů za den, a jeho účinnosti při utěšňování zlomů by nejspíš došlo k velmi rychlému utěsnění průtokových cest. Proto se předpokládá, že je průtok udržován soustavnými pohyby na zlomech.

3 Diskuze publikovaných poznatků

Z publikovaných prací vyplývá, že intenzita zvětrávání granitu je závislá na teplotě vody. Zvětrávání živců sice probíhalo za všech teplot, ale intenzita zvětrávání rostla s teplotou. U muskovitu a biotitu bylo zvětrávání patrné přibližně od 150 °C, v případě křemene, amfibolu a turmalínu až při 250°C. Za nižších teplot tak bude dominantní zvětrávání živců, které povede k tvorbě jílových minerálů a uvolňování Ca, K a Na do roztoku. Při teplotách nad 250 °C pak bude významné i rozpouštění křemene, neboť tvoří v hornině významnou část. Slídy při dostatečně vysokých teplotách budou zvětrávat podobně jako živce za vzniku jílových minerálů a uvolňování Mg, Fe, F a jiných iontů do vody. Výsledkem zvětrávání tak budou jílové minerály, voda bohatá na Ca, K, Na, Mg, Fe F a případně jiné látky. Látky rozpuštěné ve vodě mohou ovšem dále reagovat. Hořčík a draslík se často vážou na jílové minerály. Výrazně méně reaguje sodík ve vodě, který může být v menší míře vázán také na jílové minerály. Vápník se může srážet ve formě kalcitu, nebo aragonit a železo bude tvořit různé oxidy a hydroxidy železa.

Dalším významným faktorem při zvětrávání granitu, je pH vody. Při pokusech v uzavřeném okruhu byla voda výhradně zásaditá, nicméně v přírodě jsou pozorovány vody, které jsou velmi kyselé. Takové vody bývají vázány na hluboké poruchové zóny, které produkují velké množství CO₂. Oxid uhličitý je ve velkých hloubkách vlivem tlaku rozpuštěn ve vodě, kde vytváří slabou kyselinu uhličitou, která disociuje na karbonátové a vodíkové ionty (2), což způsobuje acidifikaci vody. Karbonátové ionty zůstávají v roztoku, ale ionty vodíku mohou hydrolyticky rozkládat některé minerály (Pačes, 1982).



Právě živce jsou hlavními minerály, které budou rozkládány hydrolýzou, jak je to znázorněno v chemické rovnici (1). Rozpuštění křemene, biotitu, muskovitu a jiných minerálů bude také ovlivněno hodnotou pH, proto přítomnost CO₂ bude mít velký vliv na zvětrávání granitu.

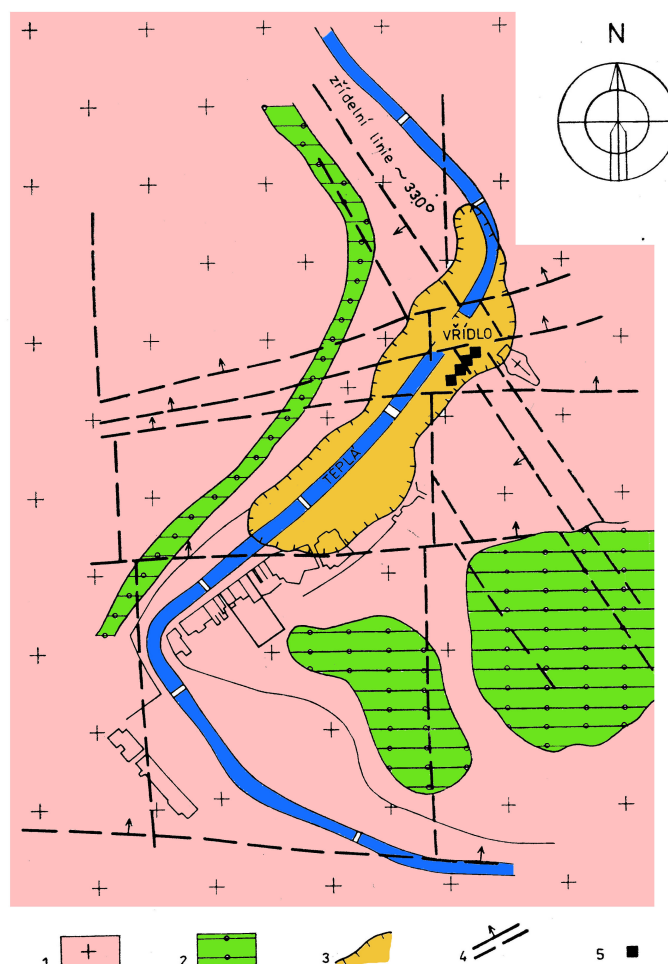
Je nepochybné, že zvětrávání a rozpouštění vede ke zvyšování propustnosti granitu, neboť dochází k odnosu materiálu, a tím i k rozšiřování průtokových cest. Odnášený materiál, ať už ve formě koloidů, nebo zcela rozpuštěný ve vodě, se může také následně ukládat na jiných místech. V pórech a mikrofrakturách bylo pozorováno ukládání jílových minerálů. To vede k utěsnění, a tedy k omezení toku do větších puklin, ve kterých se jílové minerály neudrží. Na stěnách zlomů pak bylo pozorováno především srážení amorfního křemene, kalcitu a barytu. Když se ohřátá voda bohatá na rozpuštěné látky dostává z hloubky na povrch, dochází k výraznému poklesu teploty i tlaku. To snižuje rozpustnost, což může způsobit přesycení roztoků a srážení minerálů. Přítomnost rozpuštěného CO₂ ve vodě může být důležitá nejen pro rozpouštění minerálů, ale také pro jejich srážení. Při poklesu tlaku dojde k uvolnění plynného CO₂, což vede ke zvýšení pH a následnému srážení rozpuštěných fází.

V hydrotermálních systémech tak lze předpokládat, že v hlubších zónách a v místech infiltrace bude docházet k intenzivnímu zvětrávání, což povede k růstu propustnosti cest. V místě, kde se voda dostává k povrchu, může docházet naopak ke srážení, což by vedlo k utěsňování průtokových cest. Průtok v puklinách může být udržován tektonickými pohyby, nebo si tok může najít cestu přes jiné pukliny.

4 Teplé prameny v Karlových Varech

4.1 Geologie oblasti

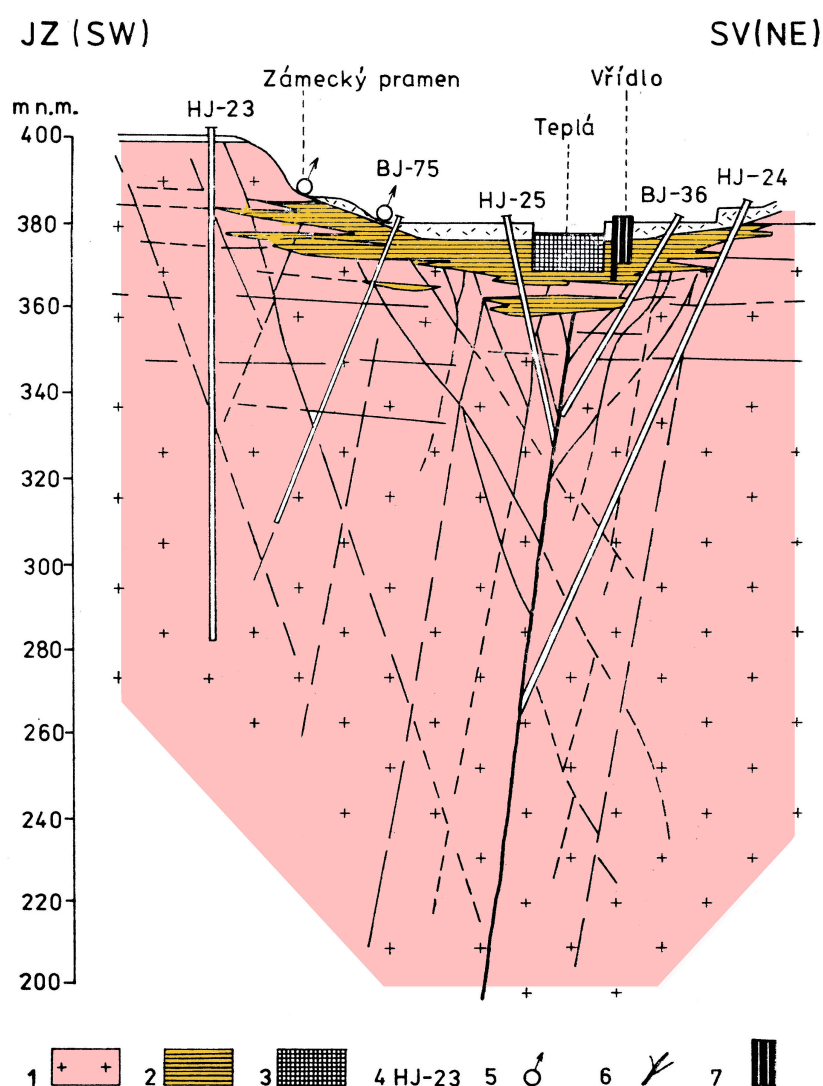
Karlovarské teplé prameny se nacházejí na západě Čech v údolí řeky Teplé, nedaleko soutoku s Ohří. Hlavní vývěry Karlovarských teplých pramenů sledují tzv. karlovarskou zřídelní linii, přibližně ve směru SSZ-JJV (obr. 3) (Krásný, 2012).



Obr. 3. Zjednodušená geologicko-tektonická mapa okolí výstupního centra karlovarské termy (podle B. Vylity 1991, upraveno) 1 – granity, 2 – štěrkopískové terasy, 3 – vřidelní deska, 4 – zlomové linie, 5 – jímací vrty Vřídla.

Podloží celé této oblasti tvoří karlovarský pluton. Tento pluton tvořený především variskými granitoidy je rozdělen oherským riftem na severní část v Krušných horách a jižní část ve Slavkovském lese. Podle stáří dále dělíme pluton na dva typy. Starší tzv. horský granit je tvořen hlavně středně zrnitými muskovit-biotitickými granity a porfyrickými granitoidy se stářím přibližně 340–320 Ma. Mladším typem jsou krušnohorské narůžovělé muskovit-biotitické žuly se stářím kolem 300–250 Ma, které jsou výrazně alterovány hydrotermálními a pneumatolytickými procesy (Chlupáč, 2011). Oherský rift, který dělí karlovarský pluton, představuje silně porušenou zónu s velkým hloubkovým dosahem. Tyto hluboké otevřené

pukliny v granitoidních horninách umožňují akumulaci termálních vod. K infiltraci dochází na jižních svazích Krušných hor a ve vyvýšených oblastech Slavkovského lesa. Síť otevřených puklin se jen slabě mineralizovaná původně povrchová voda dostává do větších hloubek, kde dochází k jejímu mísení se silně mineralizovanou fosilní vodou. Vody jsou dále syceny z hloubky vystupujícím CO₂. Podle Henryho zákona je závislé rozpouštění plynu na parciálním tlaku kapaliny a konstantě úměrnosti. Ve velkých hloubkách vlivem vysokého tlaku může být rozpuštěno výrazně větší množství CO₂, než je vůbec možné například u povrchových vod. Konstanta úměrnosti neboli Henryho konstanta je sice závislá na teplotě, s rostoucí teplotou roste konstanta, což vede ke snížení rozpustnosti, ale v námi zkoumaných podmínkách bude převládat vliv tlaku nad teplotou. Při opětovném výstupu vod po vhodných strukturách k povrchu dochází v ústí teplých pramenů vlivem uvolnění tlaku k výraznému úniku plynného CO₂ a srážení aragonitu (vřídlovce) a dalších minoritních minerálů (Vylita, 1991).



Obr. 4. Schematický geologický řez Vřídla napříč údolím řeky Teplé (podle B. Vylity 1991, upraveno) 1 – granity, 2 – vřídlovec, 3 – staré těsnění v korytě řeky Teplé, 4 - průzkumné a jímací vrty, 5 – menší karlovarské prameny, 6 – pukliny sloužící jako výstupní cesty termálních vod, 7 – staré jímací vrty vřídla.

Srážení je natolik významné, že se v údolí řeky Teplé v oblasti zřídelní linie vytvořila až několik desítek metrů mocná vřídlovcová deska (Krásný, 2012) tvořená především aragonitem, kalcitem a v malé míře hydroxidy železa (především goethitu a amorfního siderogelu), které mají za následek žluté nebo červené zbarvení horniny (Cílek, 2006). Tvorba vřídlovce omezuje volné vývěry teplých vod. To má za následek růst tlaku pod vřídelní deskou a výskyt drobných erupcí a zemětřesení (Krásný, 2012). Proto byly vyvrtány šikmé vrty, které mají za úkol jímat teplé vody a uvolňovat napětí pod povrchem (obr. 4). Při vrtných pracích se ukázala značná otevřenost hlavních výstupních kanálů v granitech, když například u vrtu HJ-24 ukončeného ve 133 metrech šikmé hloubky bylo možné spustit karotážní sondu až do hloubky 370 m (Krásný, 2012).

4.2 Karlovarské prameny

Většina Karlovarských pramenů má podobné chemické složení. Jedná se o uhlíčitou vodu typu Na-HCO₃-SO₄-Cl. Mineralizace vod se pohybuje přibližně kolem 6,4–6,8 g/l. Jedná se o nejteplejší přírodně vyvěrající prameny v oblasti Českého masívu. Hlavním Karlovarským pramenem je Vřídlo, které je s teplotou pohybující se kolem 73,4 °C nejteplejším pramenem České republiky. Teplota ostatních menších Karlovarských pramenů se teplota pohybuje v rozmezí od 30 do 66 °C. Vydatnost Vřídla je přibližně 2000 l/min což představuje 95 % celkové vydatnosti Karlovarských terem. Zbylé prameny tvoří pouhých 5 % o celkové vydatnosti 100 l/min. Vývěry Vřídla, ale i jiných pramenů doprovází značné uvolňování CO₂. Objem uvolněného CO₂ u Vřídla se pohybuje kolem 6000 l/min, takže na každý litr vody připadají 3 l CO₂. Odhaduje se, že pod bodem evaze je ve vodě rozpuštěno 6 g/l CO₂. Pro příklad byly vybrány dva chemické rozborů Karlovarských minerálních vod (Tab. 1.). Analýza vod Vřídla a Mlýnského pramene vykazují velmi podobné chemické složení. Karlovarské vody mají vysoký obsah sodíku, který se pohybuje kolem 1700 mg/l. Poměrně vysoká je také koncentrace síranů přesahující 1,6 g/l. Pačes a kol. se na základě izotopických studií domnívá, že vysoké obsahy sodíku, síranů, ale také chloridů mohou pocházet z terciérních bezodtokých jezer (solanek) (Pačes, 1981). Další významnou látkou rozpuštěnou ve vodě je hydrogenuhličitan, který s koncentrací přes 2 g/l tvoří téměř třetinu všech rozpuštěných látek. Takové množství je právě typické pro vody prosycené oxidem uhlíčitým. Hodnota pH Karlovarských vod se pohybuje kolem 6,9. Vody jsou tedy téměř neutrální, nicméně pH se pravděpodobně zvýšilo cestou k povrchu ztrátou rozpuštěného CO₂, které vodu okyselovalo. Lze tedy předpokládat, že vody v podzemí budou kyselé (Krásný, 2012).

Tab. 1. Analýza Karlovarských pramenů Vřídlo a Mlýnský pramen (v mg/l) (Krásný, 2012).

Lokalita	Vřídlo KV	Mlýnský p. KV
Datum odběru	2.3.1983	1.8.1984
Lithium	3,047	2,961
Sodík	1727	1701
Draslík	97,85	97,3
Amonium	0,609	0,462
Měď	0,0009	0,00014
Hořčík	45,72	45,36
Vápník	126,8	124,1
Stroncium	0,459	0,582
Baryum	0,045	0,0171

Zinek	0,0462	0,0807
Hliník	0,064	0,116
Vanad	0,00028	0,00061
Chrom	0,0002	0,00042
Molybden	0,00178	0,0012
Mangan	0,051	0,06
Železo	1,26	1,172
Kobalt	0,00034	0,00022
Nikl	0,00054	0,00103
Uran	<0,01	<0,01
Kationty celkem	2003	1973
Fluorid	6,27	6,688
Chlorid	613,5	603,9
Bromid	1,21	1,485
Jodid	0,034	0,0323
Hydrogensulfid	0	0
Síran	1623	1650
Dusitan	0	0
Dusičnan	0	0
Hydrogenuhlíčan	2187	2154
Anionty celkem	4432	4417
Kys. metaboritá	2,66	2,696
Kys. metakřemičitá	95,96	94,86
Celkový obsah	6534	6488
Teplota °C	71	55,5
pH	6,9	6,8

4.3 Analýza vřídlovce

Rychlost srážení vřídlovce na stěnách jímacích trubek je značná, a proto musí být i několikrát do roka vřídlovec mechanicky odstraňován. Díky tomuto čištění bylo získáno přibližně 7 kg vřídlovce (aragonitu) odebraného T. Vylitou, který se vysrážel na stěnách. Cílem analýzy bylo získat a identifikovat nerozpustný podíl sraženého sintru a pokusit se interpretovat jeho složení. Předpoklad byl, že vlivem proudění vody mohou být drobná zrna odolných minerálů unášena i na velké vzdálenosti a následně doponována do vřídlovce během jeho srážení na povrchu.

4.3.1 Příprava vzorku

Sintr jsem po částech loužil ve 12 % kyselině chlorovodíkové. Loužení probíhalo několik hodin, dokud nedošlo k úplnému rozpuštění hlavní aragonitové části. Z původních 7,04 kg sintru byl takto získán koncentrát nerozpustných, nebo špatně rozpustných zrn o hmotnosti 13,0 gramů (viz obr. 5). Tento koncentrát byl pak studován několika mineralogickými metodami.

4.3.2 Mikroskopie

Mikroskopické studium bylo provedeno pomocí binokulárního mikroskopu značky OLYMPUS SZX 16. Dokumentace byla provedena pomocí integrovaného fotoaparátu Canon EOS 1200, fotografie byly zpracovány pomocí softwaru Quick PHOTO Micro 3.0 a modulu Deep FOCUS. Na základě mikroskopování bylo odhadnuto toto zastoupení minerálů:

přibližně 70 % křemen, živce a slída, okolo 20 % oxihydroxidy železa a 10 % připadá na akcesorické minerály, organické zbytky a antropogenní materiál. Křemen, který bude pravděpodobně tvořit nadpoloviční část vzorku, lze opticky rozdělit na dva typy. Čirá až křišťálová velmi dobře opracovaná zrna a méně opracované narůžovělé úlomky a agregáty (viz. obr. 6a). Míra opracování zrn naznačuje velkou vzdálenost transportu křemene. Zajímavostí jsou dokonalé krystaly tabulkového barytu, které byly ve vzorku velmi dobře zachovány. Pravděpodobným vysvětlením je to, že baryt nebyl transportován, ale že se srážel společně s aragonitem. Na obrázku 6b. můžete v levé části vidět zachovalý krystal barytu. Protože binokulárním mikroskopem nebylo možné s přesností určit některé minerály, byl dále použit skenovací elektronový mikroskop.



Obr. 5 Vzorek získaný loužením focený pomocí binokulárního mikroskopu (Foto O. Sysel).

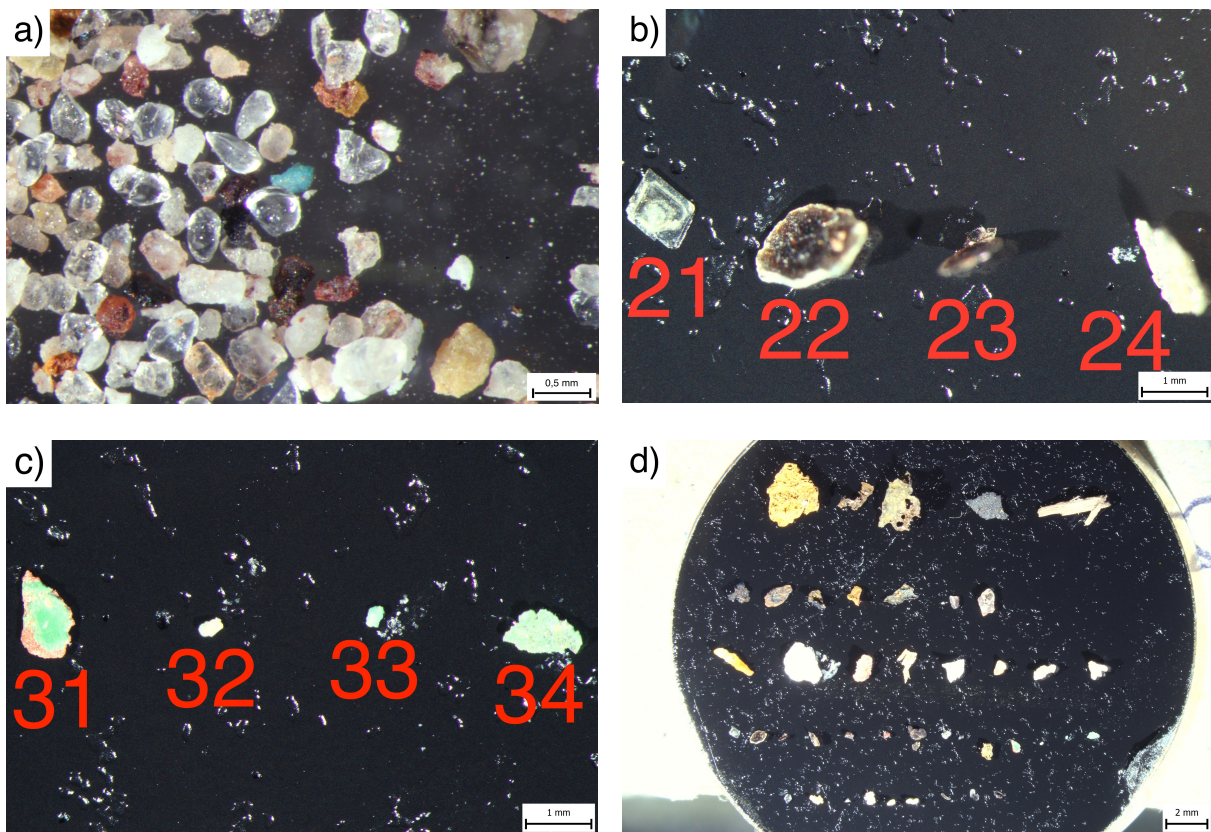
4.3.3 Skenovací elektronový mikroskop

Zrnka, krystaly a fragmenty minerálů vybraných pomocí binokulárního mikroskopu byly nalepeny na uhlíkovou podložku na kovovém nosiči, pokoveny uhlíkem a následně byly orientačně analyzovány na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) VEGA3 TESCAN s analyzátozem Bruker AXS (obr. 7). Výsledky analýzy byly shrnuty do tabulky 2.

Analyzováno bylo 43 zrn. Zrna byla vybrána tak, aby tvořila průřez nejrůznějšími typy, které byly v mikroskopu pozorovány (obr. 6d).

Zajímavostí byla drobná zelená zrna (obr. 6c). Analýza těchto zrn ukázala, že se jedná o jílové minerály. Celkově byly jílové minerály určeny devětkrát. V desíti případech se jednalo o křemen a v patnácti případech byly zjištěny oxihydroxidy železa. Jaké minerály Fe přesně nelze tímto typem analýzy určit, nicméně podle morfologie se v převážné většině bude jednat pravděpodobně o minerál goethit. To bylo následně potvrzeno i rtg difrakcí (viz dále).

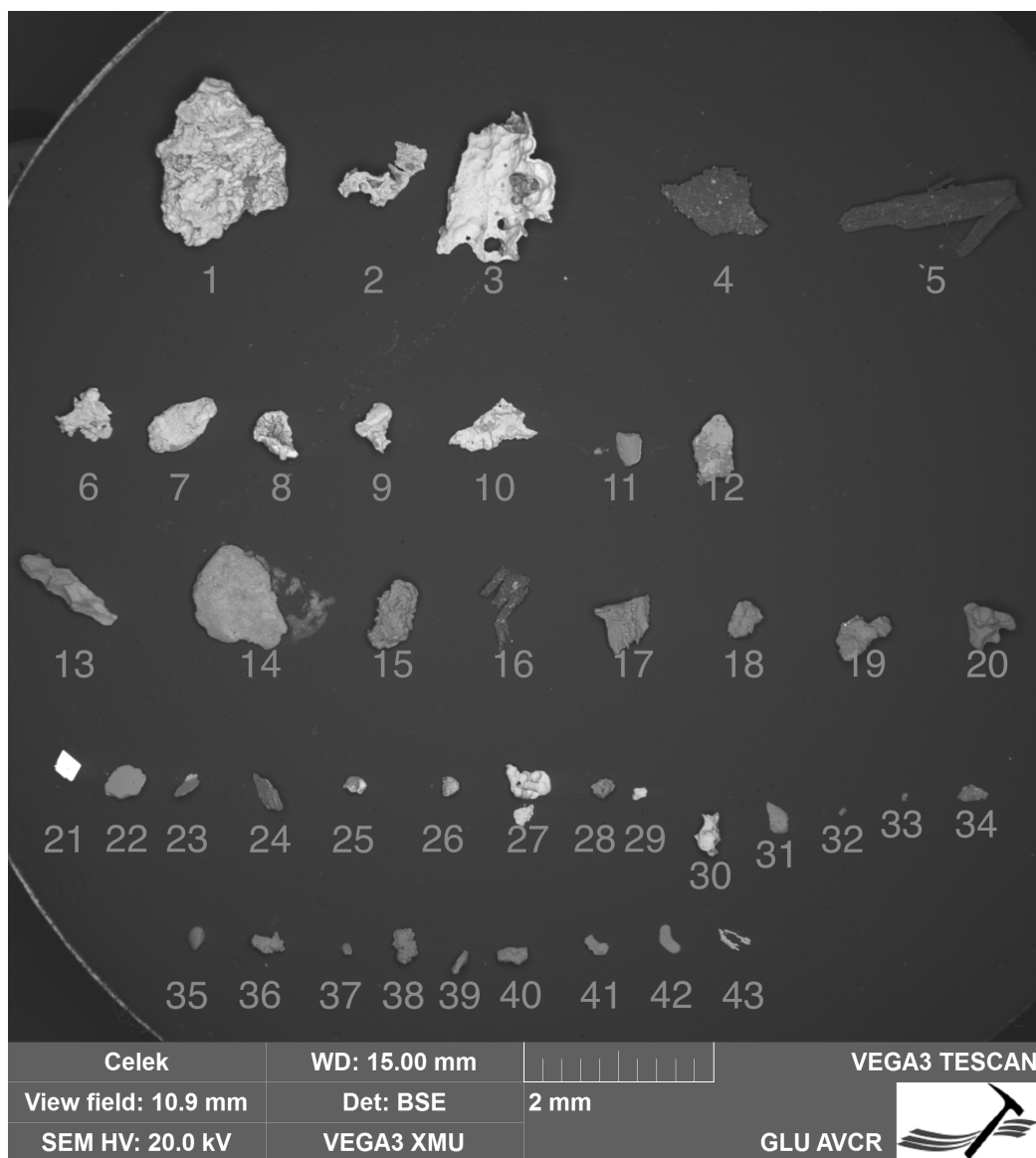
Oxihydroxidy železa jsou ve vzorku pestrou složkou nejrůznějších barev velikostí i tvarů. Tvoří často ty největší zrna ve vzorku a v některých případech byla u minerálu Fe pozorována ledvinitá struktura. U zrna č. 13 byla zjištěna neznámá směs železa a křemene dále u zrna č. 14 porézní směs Si, Ca, Ti, Mn a Fe. Forma a původ těchto zrn nejsou zcela jasné, nicméně látky, které je tvoří se běžně vyskytují v hornině. Biotit byl stanoven celkem čtyřikrát a baryt dvakrát, z toho jednou společně s jílovými minerály. U zrna č. 19 byla zjištěna přítomnost živců a oxidů Fe. Organický materiál neznámého původu byl zjištěn ve třech případech.



Obr. 6. Analýza pod mikroskopem (Foto O. Sysel) a) směs opracovaných a neopracovaných zrn křemene; b) 21 zachovalý krystal barytu, 22–24 šupinky biotitu; c) 31–34 jílové minerály; d) preparát připravený pro analýzu pomocí SEM.

Tab. 2. Výsledky SEM.

Minerál	Číslo analyzovaného zrna
Křemen	11; 15; 17; 18; 20; 28; 35; 36; 37; 38
Biotit	12; 22; 23; 24
Oxihydroxidy Fe	1; 2; 3; 6; 7; 8; 9; 10; 19; 25; 26; 27; 29; 30; 43
Jílové minerály	28; 31; 32; 33; 34; 39; 40; 41; 42
Baryt	21; 31
Živce	19
Organický materiál	4; 5; 16;
neznámá směs Si a Fe	13
porézní směs Si, Ca, Ti, Mn a Fe	14



Obr. 7. Analýza SEM, jednotlivé minerály byly očíslovány (Noemi Meszárosová).

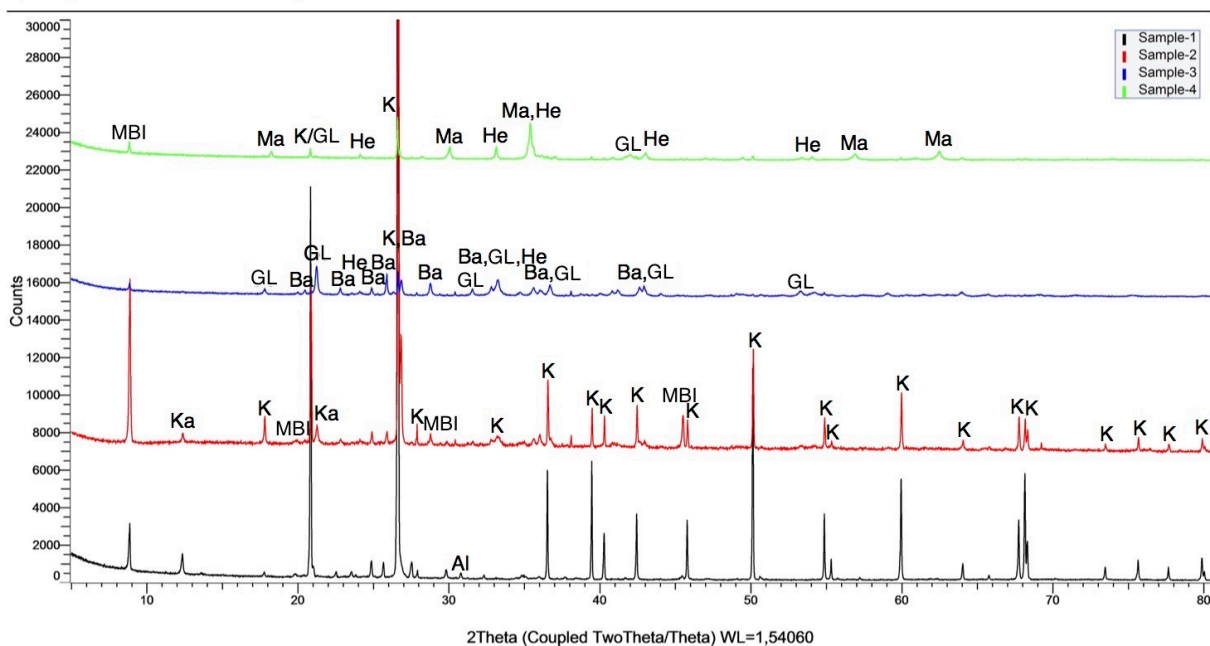
4.3.4 Prášková rentgenová difrakce

Další použitou analytickou metodou byla prášková rentgenová difrakce. Aby bylo možno difraktogramy lépe identifikovat, tj. snížil se počet analyzovaných fází v kroku, byl vzorek před analýzou rozdělen na několik frakcí. Koncentrát byl nakvartován a dvě protilehlé čtvrtiny byly použity pro rozčlenění minerálních fází podle hustoty v těžkých kapalinách, konkrétně v neředěném bromoformu a posléze v neředěném methylenjodidu. Takto byly získány tři frakce: (1) lehká o hustotě menší než $2,85 \text{ g.cm}^{-3}$, (2) středně těžká do $3,15 \text{ g.cm}^{-3}$ a (3) těžká nad $3,15 \text{ g.cm}^{-3}$. Dále byla elektromagnetickým separátorem oddělena ještě magnetická frakce (4). Po orientační dokumentaci čistoty byly pak frakce jednotlivě rozetřeny v achátové misce, nanесeny na podložní sklička a následně analyzovány práškovou rentgenovou difrakcí (na přístroji PANalytical X'Pert Pro difraktometr) bylo stanoveno minerální složení těchto frakcí. Všechny stanovené minerály práškovou rentgenovou difrakcí byly shrnuty do tabulky 3.

Analýzou čtyř frakcí bylo zjištěno celkem 14 různých minerálů. Minerály bornit a wustit stanovené měřením nejsou ve vzorku s největší pravděpodobností přítomny. Minerály goethit

a lepidokrokit jsou na obr. 8 a jsou spojeny do společné skupiny, neboť touto metodikou je obtížné jejich rozlišení. Ze stejného důvodu jsou také řazeny minerály biotitu, muskovitu, a illitu do jedné skupiny. V nejlehčí frakci se nacházely pouze minerály, které se běžně vyskytují v granitech, až na kaolinit, který je naopak běžným sekundárním minerálem. V magnetické frakci bylo stanoveno nejvíce minerálů. Z celkových čtrnácti jich bylo zjištěno osm. Polovina z těchto minerálů byly různé oxidy a hydroxidy železa. Minerály lze rozdělit do tří kategorií. Primární minerály, které se běžně vyskytují v granitech byly zeleně vyznačené v tabulce 3. Sekundární novotvořené minerály byly vyznačeny žlutě a oxihydroxidy železa modře. Minerály železa jsou řazeny zvlášť, protože původ oxihydroxidů nelze přesně určit, vzhledem k jejich loužení v kyselině solné a vystavení atmosférickému kyslíku.

(Coupled TwoTheta/Theta)



Obr. 8. Výsledky práškové rentgenové difrakce (Petr Mikysek, doplněno o indexy) Sample-1 lehká frakce, Sample-2 středně těžká frakce, Sample-3 těžká frakce, Sample-4 magnetická frakce; Al – albit, An – anortit, Ba – baryt, Bo – bornit, GL – goethit/lepidokrokit, He – hematit, K – křemen, Ka – kaolinit, Ma – magnetit, MBI – muskovit/biotit/illit, Mi – mikroklin, Or – ortoklas.

Tab. 3. Seznam všech minerálů stanovených pomocí práškové rentgenové difrakce

Název minerálu	Vzorec	Název minerálu	Vzorec
Křemen	SiO ₂	Hematit	Fe ₂ O ₃
Muskovit	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	Goethit	Fe ⁺³ O(OH)
Kaolinit	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Baryt	Ba(SO ₄)
Ortoklas	KAlSi ₃ O ₈	Lepidokrokit	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O
Albit	NaAlSi ₃ O ₈	Magnetit	Fe ₃ O ₄
Mikroklin	KAlSi ₃ O ₈	Wustit	FeO
Anortit	CaAl ₂ (SiO ₄) ₂	Bornit	Cu ₅ Fe ₄ S ₄

5 Diskuze

Mineralogická analýza koncentráту nerozpustných zrn odpovídá v generelu relikťům granitových hornin. Byly zjištěny prakticky všechny základní minerály granitu – křemen, živce (draselné, i sodno-vápenaté) a slídy. Různý stupeň opracování u zrn křemene a spíše nižší stupeň opracování u živců ukazuje na dlouhý i kratší transport zrn. Všechna tato zrna byla jednoznačně přinesena proudící vodou z různých hloubek a zachycena na stěnách v aragonitovém sintru při jeho srážení.

Pestrost oxidů a oxihydroxidů železa snad u kazuje na jejich rozdílné geneze. Podle převládající morfologie v podobě velmi tenkých povlaků a krustiček s ledvinitým povrchem a negativními vtisky na jejich spodních částech je pravděpodobné, že minimálně některé z nich (snad většina) se srážely spolu s aragonitem a tvořily mezivrstvy ve vrstvách vřídlovce.

Toto by bylo ve shodě s pozorováním například Cílka a kol. (2006).

Určit přesněji, které oxihydroxidy Fe jsou přítomny a v jakých poměrech, by vyžadovalo jiné metodiky. Převaha goethitu ve vzorku je však pravděpodobná vzhledem k podmínkám i tomu, že většina oxihydroxidů Fe se postupně transformuje na goethit (Cornell a Schwertmann, 1996).

Přítomnost dalších typů oxihydroxidů železa může ale ukazovat i na zvětrávání biotitu či případně sulfidů. Analýzy granitu získaných z průzkumných vrtů v Karlových Varech ukazují na 5–10 % zastoupení biotitu v hornině (Vylita, 1991), což je významný zdroj železa.

Typická je i přítomnost kaolinitu (a/i illitu – zvolenou metodikou nelze jednoznačně rozlišit) jakožto sekundárního produktu hydrotermální alterace granitu, resp. živců. Provedené rentgenové analýzy nedovolují přesnější určení jílových minerálů, ale z dříve publikované práce je známo (analýzy provedených na alterované žule 10–60 cm vzdálené od vertikálních hydrotermálně postižených zón), že se vyskytuje i smektit (Cílek a kol., 2006).

Nejasný je původ magnetitu, který byl nalezen ve vzorku magnetické frakce. Magnetit by mohl ukazovat na relikty vulkanitů (čediče), a nebo skarnů, které jsou bohaté na magnetit a hojně se vyskytují v oblasti Krušných hor.

Zajímavý je výskyt dokonale omezených krystalů barytu. Baryt tedy s největší pravděpodobností bude krystalizovat spolu s aragonitem v rámci sintrové sedimentace a to v momentech, kdy dojde k přesycení barytem. Dokonalost krystalů ukazuje snad na růst ve volném prostoru, tedy na povrchu sedimentačních vrstev. To by ale muselo být ověřeno dalším podrobnějším studiem. Přestože výskyt barytu v oblasti karlovarských pramenů byl již dříve popsán (Bohatý, 1993), zde se jedná o novou nálezovou situaci s odlišným procesem vzniku. Ve vřídelním sintru nebyl dosud baryt popsán. Vzhledem k velmi častým výskytům velkých krystalů barytu ve vřídelních strukturách teplické oblasti (Ulrych, 2007), by bylo zajímavé nějaké podrobnější srovnání barytů z obou oblastí. To je však nad rámec této práce.

Výhodou prováděného mineralogického rozboru je to, že zrna uzavřená v aragonitu jsou loužením separována a lze tak zkoumat jejich velikost, tvar a míru opracování. Dále byly odstraněním aragonitu koncentrovány minoritní minerály, které by nemusely být z důvodu velmi malého zastoupení identifikovatelné, neboť aragonit tvořil kolem 99 % hmoty.

Nevýhodou bylo loužení v kyselině solné, které bylo nutné pro odstranění aragonitu.

Loužením mohly být odstraněny některé další rozpustné minerály.

Výsledky mineralogických analýz jsou ve shodě s výzkumy, které byly doposud provedeny v dané lokalitě. Výrazná podobnost karlovarských pramenů je například s oblastmi Kangwon, Chungcheng a Kyungpook v Jižní Koreji, kde se také nacházejí prameny výrazně nasycené oxidem uhličitým, které vyvěrají z granitového masívu (Jeong, 2005). Ukazuje se značný vliv CO₂ na rozpouštění a srážení minerálů.

Z prezentovaných výzkumů v kapitole 2 vyplynulo, že nejméně odolnými minerály jsou živce. Výrazné rozpouštění živců je možné pozorovat i v oblasti karlovarských pramenů. Například chemický rozbor vody (tab. 1) ukazuje velmi vysokou koncentraci sodíku (1,7 g/l), která je způsobena rozpadem albitu. Vápník, který pochází z rozpadu anortitu je ve vodě rozpouštěn v koncentraci pohybující se kolem 0,125 g/l, což je výrazně méně než sodíku, nicméně původní koncentrace Ca byla pravděpodobně výrazně větší, neboť masivním srážením aragonitu došlo k velké spotřebě Ca rozpouštěného ve vodě. Dále je možné v Karlových varech pozorovat známky sebeorganizace toku v oblasti vývěru pramenů. Jedním ze znaků je velká otevřenost pukliny (jednoho z hlavních vývěrových kanálů), která byla navrtána pomocí šikmého vrtu HJ-24 (Krásný, 2012). Dále bylo při stavebních pracích nalezeno několik vertikálních hydrotermálních zón, vyplněných jílovými minerály, brekciovanou žulou a hematitem (Cílek a kol., 2006).

6 Závěr

V rešeršní části této práce jsem shrnul dosavadní poznatky zaměřené na zvětrávání granitu a proudění vody v granitech. Z publikovaných prací se ukazuje, že na zvětrávání horniny má významný vliv teplota vody a přítomnost rozpuštěného oxidu uhličitého, který může výrazně přispět k acidifikaci vody. Publikované výsledky experimentálních prací prokázaly, že nejméně odolnými horninotvornými minerály jsou živce, které s vodou reagovaly při všech teplotách. Při teplotách nad 200 °C pak výrazněji reagují i slídy biotit a muskovit. Rozpad živců i slíd doprovází tvorba jílových minerálů, které se mohou ukládat v úzkých puklinách a pórech a mohou tak výrazně snižovat propustnost horniny. V případě, že je puklina dostatečně velká a průtok puklinou značný, může docházet k odnosu materiálu, což povede ke zvětšování kanálů, ve kterých se bude soustředit tok vody horninou. Takovéto široké kanály s vydatnými průtoky jsou pozorovány například v Karlových Varech, kde jimi proudí k povrchu teplé minerální vody.

Proto byla v další části práce stručně shrnuta situace v oblasti Karlových Varů. Rešerše byla doplněna o výzkum minerálního složení nerozpustného podílu, který je unášen termami k povrchu. Cílem bylo posoudit charakter prostředí, jímž termální vody protékají. Z pramene Vřídlo jsem získal vzorek aragonitového sintru, ze kterého se podařilo separovat pomocí zředěné HCl nerozpustný zbytek. Mikroskopickou analýzou i rentgenovou difrakcí byly ve vzorku identifikovány především minerály pocházející z granitu. Různý stupeň opracování ukazuje na dlouhý i kratší transport zrn a tedy na různé zdroje. To dokládá, že systém otevřených kanálů dosahuje značné hloubky a zastihuje zřejmě různé typy granitů. Tyto výsledky mineralogické analýzy jsou i přes určité nové informace v souladu s dřívějšími pozorováními. Nové informace se týkají přítomnosti dobře krystalovaného barytu, což ukazuje na jeho spolu-srážení s aragonitem a výskyt magnetitu, který snad ukazuje, že vody byly v delším kontaktu i s vulkanity nebo skarny, které se v Krušných horách také běžně vyskytují.

7 Zdroje:

Azaroual, M.; Fouillac, C. (1997): Experimental study and modeling of granite-distilled water interactions at 180°C and 14 bars. *Applied Geochemistry* 12, 55-73

Bear, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Str. 685, Environmental science series, New York, ISBN-13: 978-0-486-65675-5

Black, J.H. (1987): Flow and flow mechanisms in crystalline rock. *Fluid flows in Sedimentary Basins and Aquifers*, Geological Society Special Publication 34, 185-200

Bohatý, M. (1993) Radiobaryt z Karlových Varů. *Minerál* 2/6, 257-258, vyd. dr. M. Bohatý, Brno

Bons P.D. (2000): The formation of veins and their microstructures. *Journal of the Virtual Explorer* 2., <http://www.tectonique.net/MeansCD/contribs/bons/index.html> (5.8.2017)

Bons, P.D.; Elburg, M.A.; Gomez-Rivas, E. (2012): A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *Journal of Structural Geology* 43, 33-62

Cílek, V.; Vylita, T.; Filippi, M. (2006): Mineralogie karlovarské vřídelní desky a jejího podloží. *Minerál* 14/1, 3-10, vyd. dr. M. Bohatý, Brno, ISSN 1213-0710

Cornell, R.M., Schwertmann, U., 1996. *The Iron Oxides — Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*. VCH (Federal Republic of Germany), Weinheim. New York, Basel, Cambridge, Tokyo, 573 pp.

Grant, M.A., Bixley, P.F. (2011): *Geothermal Reservoir Engineering*. 2nd ed. Academic Press, Burlington, ISBN 978-0-12-383880-3

Griffiths, L.; Heap, M.J.; Wang, F.; Daval, D.; Gilg, H.A.; Baud, P.; Schmittbuhl, J. (2016): Geothermal implications for fracture-filling hydrothermal precipitation. *Geothermics* 64, 235-245

Chlupáč, I., et al. (2011). *Geologická minulost České republiky*. Str. 204, Academia, Praha, ISBN 978-80-200-1961-5

Jeong, C.H.; Kim, H.J.; Lee, S.Y. (2005): Hydrochemistry and genesis of CO₂-rich springs from Mesozoic granitoids and their adjacent rocks in South Korea. *Geochemical Journal* 39, 517-530

Krásný, J., et al. (2012) *Podzemní vody České republiky: regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Str. 232-242, Česká geologická služba, Praha, ISBN 978-80-7075-797-0

Mayo, A.L.; Himes, S.A.; Tingrey, D.G (2014): Self-organizing thermal fluid flow in fractured crystalline rock: a geochemical and theoretical approach to evaluating fluid flow in the southern Idaho batholith, USA. *Hydrogeology Journal* 22, 25-45

Moore, D.E.; Morrow, C.A.; Byerlee, J.D. (1983): Chemical reactions accompanying fluid flow through granite held in a temperature gradient. *Geochemica et Cosmochemica Acta* 47, 445-453

Ortoleva, P.; Merino, E.; Moore, C.; Moore, C.; Chadam, J. (1987): Geochemical self-organization I: reaction-transport feedbacks and modeling approach. *American Journal of Science* 287, 979–1007

Pačes, T. (1982): Voda a země. Str. 62, Academia, Praha, 509-21-826

Pačes, T.; Šmejkal, V.; Pazdera, A.; Kobrová, M.; Barnet, I. (1981) Ojedinělý typ solanky v podloží chebské pánve. *Geologický Průzkum* 23, 7, 196-198.

Savage, D.; Cave, M.R.; Milodowski, A.E.; George, I. (1987): Hydrothermal alteration of granite by meteoric fluid: an example from the Carnmenellis Granite, United Kingdom. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 96, 391-405

Savage, D. (1986): Granite-water interactions at 100°C, 50 MPa: an experimental study. *Chemical Geology* 54, 81-95

Ulrych, J.; Adamovič, J.; Žák, K.; et al. (2007) Cenozoic “radiobarite” occurrences in the Ohře (Eger) Rift, Bohemian Massif: Mineralogical and geochemical revision. *Chemie der Erde* 67, 301-312

Vylita, B., et al. (1991) Nové poznatky o karlovarské zřídelní struktuře. Ústřední ústav geologický, Praha ISBN 80-7075-021-9