

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,  
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

# **Solné zvětrávání svrchnokřídových pískovců Křídelních stěn (NP České Švýcarsko)**

Diplomová práce

Lenka Melounová



Vedoucí diplomové práce. Doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.  
Konzultant. Mgr. Zuzana Vařilová (NP ČŠ)

Praha 2006

## ABSTRAKT

Svrchnokřídové křemenné pískovce Křídelních stěn v Národním parku České Švýcarsko se vyznačují zvýšenou tvorbou solných výkvětů na skalním povrchu. Některé aspekty solného zvětrávání byly studovány za účelem sledování proměnlivosti distribuce solí přítomných v povrchové vrstvě horniny a s ní souvisejících změn fyzikálních vlastností horniny. Cílem je zejména ověření případné závislosti výskytu konkrétních fází na výšce a expozici vůči světovým stranám a sledování vertikálních změn koncentrace solí v hornině.

Pomocí optické mikroskopie v procházejícím a ultrafialovém světle a elektronové mikrosondy byl studován petrologický charakter horninových vzorků, laboratorně byly stanoveny jejich fyzikální vlastnosti. K určení mikropórovitosti byla využita metoda vysokotlaké Hg porozimetrie. Identifikace hlavních minerálních fází solných výkvětů byla provedena pomocí metody rentgenové difrakční analýzy (XRD); minoritní složky vodorozpustných solí v povrchové vrstvě horniny byly stanoveny metodou iontově výměnné chromatografie (IEC).

Solné krusty jsou tvořeny nejčastěji sádrovcem ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Mezi další minerální fáze identifikované v solných krustách Křídelních stěn patří čermíkit ( $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), alunit ( $\text{K}(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ ), alunogen ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ ), hydrofilit ( $\text{CaCl}_2$ ) a nitramit ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Výskyt solných krust je ovlivněn geografickou expozicí ke světové straně a rozpustností. Více rozpustné soli (chloridy, dusičnany, čermíkit) krystalizují spíše na stěně exponované na jih, zatímco na severní stěně se vyskytuje pouze méně rozpustný sádrovec a  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

Vertikální distribuce solí v přírodních horninových výchozech se liší od rozložení solí ve zdivu exteriéru budov. Distribuce solí ve 2-2,5 m vysokém vertikálním profilu Křídelních stěn je ovlivněna vztlínající vlhkostí i prosakováním vlhkosti z vyšších partií. Maximální koncentrace solí (síranů a dusičnanů) nahromaděných vztlínající vlhkostí se vyskytuje ve výšce 1-1,5 m nad terénem. Přínos solí z vyšších partií je ovlivněn členitostí a výškou stěny a projevuje se zvýšenou koncentrací síranů a dusičnanů ve výšce 2-2,5 m.

Se změnami koncentrace solí v hornině souvisí i změny fyzikálních vlastností hornin. S rostoucí koncentrací síranů a dusičnanů dochází k nárůstu pórovitosti, mikropórovitosti, vlhkosti a nasákavosti horniny, a tím i náchylnosti horniny vůči zvětrávání.

## SUMMARY

Křídelní stěny cliffs (National Park Bohemian Switzerland) are built of the Upper Cretaceous quartz sandstones. Salt efflorescences on the rock surface represent widespread weathering phenomenon in this area. This thesis is focused on the spatial variation of the distribution of different salts species. The changes in physical properties that accompany this weathering phenomenon were studied as well.

Petrographic characteristics of sandstones have been studied by conventional optical microscopy and ultraviolet light microscopy of thin sections prepared by staining of the pores space using fluorescent dye – epoxy resin mixture. Selected sandstone samples were examined by electron microscopy in order to show changes in porosity and cement content in surface layers showing case hardening. Study of physical properties focused on the changes in water absorption, bulk porosity and microporosity. The latest parameter was determined by high pressure mercury porosimetry. The phase analysis of salt efflorescences was performed by X-ray diffraction (XRD). The presence of minor phases, that are not detectable by XRD analysis, was extrapolated from the results obtained by the analysis of water soluble salts (ion exchange chromatography, IEC).

Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  are the most common minerals of the studied salt efflorescences. Other minerals detected are tsermigite ( $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), alunite ( $\text{K}(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ ), alunogen ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ ), hydrophilite ( $\text{CaCl}_2$ ) and nitrammite ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). The occurrence of salt efflorescences on the rock surface is affected by geographical exposition and solubility. Salts with higher solubility (chlorides, nitrates, tsermigite) crystallize preferentially on the cliffs exposed to the south, whereas the north side is characterized by less soluble phases – gypsum and  $\text{K}(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ .

Vertical zonation of salt distribution on natural outcrops differs from the salt distribution in masonry. Salt distribution near the base of cliff (about 2-2.5 m above the ground) is affected by capillary rise from the ground level (maximum salt concentration is at the level 1-1.5 m) and by percolation of atmospheric precipitation from the higher parts of the cliff (higher salt content at the level 2-2.5 m above the ground). Percolation of salt solution from higher parts is affected by asperity of rock surface.

Changes of physical properties of studied rock partly follow variation of the content of water-soluble salts in rock pore system. The porosity, microporosity, moisture content and absorption generally increase with the increasing volume of sulphates and nitrates.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SOLNÉ ZVĚTRÁVÁNÍ PÍSKOVCŮ</b> .....	<b>2</b>
2.1	PROCESY SOLNÉHO ZVĚTRÁVÁNÍ.....	2
2.2	PŮVOD SOLÍ V HORNINĚ .....	2
2.3	POHYB SOLÍ V HORNINĚ .....	3
2.4	KRYSTALIZACE SOLÍ .....	3
2.5	DISTRIBUCE SOLÍ V HORNINĚ .....	4
2.6	SOLNÉ VÝKVĚTY (KRUSTY).....	5
2.6.1	Efflorescence a subflorescence .....	5
2.6.2	Složení solných krust .....	5
2.6.3	Chemismus a fázové složení solných krust v české křídové pánvi.....	7
2.7	DALŠÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SOLNÉ ZVĚTRÁVÁNÍ.....	7
2.7.1	Klimatické faktory .....	7
2.7.2	Vlastnosti horniny .....	8
2.7.3	Geografické parametry.....	8
2.7.4	Složení atmosféry.....	8
2.7.5	Povrchové zpevňování - vznik skalních kůr .....	9
2.8	MORFOLOGICKÉ PROJEVY ZVĚTRÁVÁNÍ NA SKALNÍM POVRCHU.....	10
<b>3</b>	<b>STUDOVANÉ ÚZEMÍ</b> .....	<b>11</b>
3.1	GEOGRAFICKÁ POLOHA.....	11
3.2	GEOLOGIE ÚZEMÍ.....	12
3.2.1	Geologické podloží .....	12
3.2.2	Platformní pokryv .....	13
3.2.3	Tektonický vývoj území .....	15
3.2.4	Geomorfologický vývoj území .....	15
<b>4</b>	<b>ODBĚR A PŘÍPRAVA VZORKŮ</b> .....	<b>17</b>
4.1	MÍSTA ODBĚRU.....	17
4.1.1	Odběr solných výkvětů .....	17
4.1.2	Odběr horniny .....	18
4.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	19
4.2.1	Příprava vzorků pro stanovení fyzikálních vlastností horniny.....	19
4.2.2	Příprava vzorků pro určení pórovitosti vysokotlakou rtuťovou porozimetrií .....	19



4.2.3	Příprava vzorků pro fázovou analýzu pomocí rentgenové difrakční analýzy .....	19
4.2.4	Příprava vzorků pro stanovení obsahu vodorozpustných solí.....	19
4.2.5	Příprava vzorků pro optickou mikroskopii a mikroskopii v ultrafialovém světle.....	19
4.2.6	Příprava vzorků pro použití elektronové mikroanalýzy .....	19
<b>5</b>	<b>ANALYTICKÉ ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>20</b>
5.1	PŘEHLED POUŽITÝCH METOD.....	20
5.2	URČENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ HORNIN .....	21
5.2.1	Měrná hmotnost .....	21
5.2.2	Objemová hmotnost.....	21
5.2.3	Pórovitost.....	22
5.2.4	Vlhkost.....	22
5.2.5	Nasákavost.....	22
5.3	VYSOKOTLAKÁ RTUŤOVÁ POROZIMETRIE .....	22
5.4	RENTGEN DIFRAKČNÍ ANALÝZA (XRD).....	23
5.5	IONTOVĚ VÝMĚNNÁ CHROMATOGRAFIE (IEC) .....	23
5.6	OPTICKÉ MIKROSKOPIE A MIKROSKOPIE V ULTRAFIALOVÉM SVĚTLE .....	24
5.7	ELEKTRONOVÁ MIKROANALÝZA (MIKROSONDA).....	24
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>25</b>
6.1	PETROGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA HORNINY .....	25
6.2	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI HORNIN .....	29
6.3	MIKROPÓROVITOST STANOVENÁ VYSOKOTLAKOU RTUŤOVOU POROZIMETRIÍ.....	29
6.4	FÁZOVÉ A CHEMICKÉ SLOŽENÍ PŘÍTOMNÝCH SOLÍ: .....	30
6.4.1	Fázové složení solných výkvětů .....	30
6.4.2	Chemismus vodorozpustných solí přítomných v hornině.....	32
<b>7</b>	<b>DISKUZE.....</b>	<b>33</b>
7.1	CHEMICKÉ A FÁZOVÉ SLOŽENÍ SOLNÝCH KRUST A VÝKVĚTŮ .....	33
7.2	VÝSKYT SOLNÝCH KRUST A VÝKVĚTŮ V ZÁVISLOSTI NA GEOGRAFICKÝCH PARAMETRECH .....	35
7.3	DISTRIBUCE SOLÍ V HORNINĚ .....	36
7.4	ZMĚNY FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ HORNIN .....	40
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>44</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ V TEXTOVÉ ČÁSTI

- Obr. 1.** Závislost výšky vztlínání vody na průměru kapiláry .
- Obr. 2.** Výškový profil distribuce solí a zón porušení ve stěně budovy podle Arnolda a Zehndera (1990).
- Obr. 3.** Eflorescence a subflorescence.
- Obr. 4.** A. Vnitřní skalní kůra - endokrusta, B. Vnější skalní kůra - exokrusta.
- Obr. 5.** Skalní kůra z okolí Křídelních stěn v NP České Švýcarsko.
- Obr. 6.** Náčrt mapky ukazující polohu Křídelních stěn, Pravčické brány a Mezní Louky.
- Obr. 7.** Mapa ukazující polohu NP České Švýcarsko, NP Saské Švýcarsko a sousední chráněné krajinné oblasti.
- Obr. 8.** Schematická geologická mapa české křídové pánve.
- Obr. 9.** Geologický vývoj Českého Švýcarska.
- Obr. 10.** Schematická mapka odběrových míst.
- Obr. 11.** Monokrystalický křemen a zrno polykrystalického křemene ve vzorku KS/V/2.
- Obr. 12.** Zvýrazněním pórového prostoru fluorescencí v UV záření je dobře viditelný hojný pórový prostor a propojenost pórů u vzorku KS/VI/5. Patrná je také špatná zrnitostní vytríděnost a ostrohranost klastů.
- Obr. 13.** Exfoliační trhliny v povrchové vrstvě horniny vzorku KS/IV/3 viditelné v UV světle, pórový prostor povrchové vrstvy je místy vyplněn druhotnou silicifikací a oxyhydroxidy Fe.
- Obr. 14.** Všesměrné intraklastické mikrotrhliny v křemeni zvýrazněné fluorescencí v UV světle u vzorku KS/VI/1.
- Obr. 15.** Oxyhydroxidy Fe, které vyplňují pórový prostor mezi klasty křemene vzorku KS/IV/2, v II nikolech.
- Obr. 16.** Sloupečkovitý klast biotitu mezi klasty křemene u vzorku KS/IV/2. Na velkém křemenném klastu (vpravo dole) je patrný tenký povlak jílových minerálů. X nikoly.
- Obr. 17.** Fotografie povrchové vrstvy vzorku KS/IV/2 ve zpětně odražených elektronech. Pórový prostor těsně u povrchu horniny je zcela vyplněn druhotnou silicifikací s příměsí oxyhydroxidů Fe. Směrem do hloubky je pórový prostor hojnější.
- Obr. 18.** Krystalky kaolinické základní hmoty mezi klasty křemene (tmavší klasty) a živcem (světlejší klast) viditelné ve zpětně odražených elektronech u vzorku KS/IV/2
- Obr. 19.** Póry v povrchové vrstvě vzorku KS/I/4 nejsou zpevněné tmelem, jsou otevřené a vyplněné organickou hmotou a prachovými částicemi.
- Obr. 19.** Póry v povrchové vrstvě vzorku KS/I/4 nejsou zpevněné tmelem, jsou otevřené a vyplněné organickou hmotou a prachovými částicemi.
- Obr. 20.** Detail výplně povrchových pórů vzorku KS/I/4.
- Obr. 21.** Hloubkové změny koncentrace aniontů vzorku KS/IV/2-1 až KS/IV/2-4.
- Obr. 22.** Hloubkové změny koncentrace kationtů vzorku KS/IV/2-1 až KS/IV/2-4.

- Obr. 23.** Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  v severním defilé Křidelních stěn (profil I).
- Obr. 24.** Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny v severním defilé Křidelních stěn (profil I).
- Obr. 25.** Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  v jižním defilé Křidelních stěn (profil IV).
- Obr. 26.** Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny v jižním defilé Křidelních stěn (profil IV).
- Obr. 27.** Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  ve východním defilé Křidelních stěn (profil V).
- Obr. 28.** Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny ve východním defilé Křidelních stěn (profil V).
- Obr. 29.** Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  v západním defilé Křidelních stěn (profil VI).
- Obr. 30.** Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny v západním defilé Křidelních stěn (profil VI).
- Obr. 31.** Přibližný náčrt celkového povrchu studovaných skalních stěn.
- Obr. 32.** Vertikální změny mikropórovitosti (v obj. %) v severním (KS/I) a jižním (KS/IV) defilé Křidelních stěn.
- Obr. 33.** Vertikální změny mikropórovitosti (v obj. %) ve východním (KS/V) a západním (KS/VI) defilé Křidelních stěn.

## SEZNAM TABULEK V TEXTOVÉ ČÁSTI

**Tab. 1.** Hlavní evaporitní minerály solných krust podle Goudie a Viles (1997).

**Tab. 2.** Seznam odebraných vzorků, výška odběru a expozice odběrových míst ke světové straně.

**Tab. 3.** Přehled použitých metod u jednotlivých vzorků.

**Tab. 4.** Výsledky stanovení fyzikálních vlastností hornin.

**Tab. 5.** Výsledky měření pórovitosti vysokotlakou Hg porozimetrií.

**Tab. 6.** Fázové složení solných výkvětů určené metodou práškové rentgenové difrakce.

**Tab. 7.** Koncentrace aniontů a kationtů vodorozpustných solí v hornině určená metodou IEC z horninového vodného výluhu.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA I.** Mapa znázorňující geologickou stavbu okolí Křídelní stěny podle Valečky (1997).

**PŘÍLOHA II.** Bližší popis odběrových míst a odebraných vzorků.

**PŘÍLOHA III.** Mikroskopická charakteristika hornin Křídelních stěn.

**PŘÍLOHA IV.** Grafy velikostního zastoupení pórů určeného metodou vysokotlaké Hg porozimetrie.

**PŘÍLOHA V.** Grafické znázornění difraktogramů solných krust.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BEI – zpětně odražené elektrony (Back Scattered Electron Image)

ČGS – Česká geologická služba

CHKO – chráněná krajinná oblast

IEC – iontová výměnná chromatografie (ion-exchange chromatography)

NP – národní park

NP ČŠ – Národní park České Švýcarsko

PřF UK – Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

RTG záření – rentgenové záření

ÚGMNZ – Ústav geologie, mineralogie a nerostných zdrojů

ÚSMH AVČR – Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie věd České republiky

XRD – rentgen difrakční analýza (X-ray diffraction)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat všem, bez kterých by tato práce nevznikla. Poděkování patří zejména mému školiteli Doc. R. Příkrylovi za všechny cenné rady a připomínky, Mgr. Z. Vařilové za pomoc v terénu a poskytnutí vlastních naměřených dat a Správě NP České Švýcarsko, která poskytla finanční zajištění části chemických analýz.

Dále bych chtěla poděkovat pí. Strakové za pracné laboratorní stanovení fyzikálních vlastností hornin, Mgr. P. Drahotovi za naměření XRD záznamů, pí. Bláhové za rychlé zhotovení horninových výbrusů, RNDr. J. Malecovi za interpretaci výsledků z mikrosondy, ÚSMH AVČR a ÚGMNZ, PřF UK. V neposlední řadě patří poděkování mým rodičům Ivaně a Ivanu Melounovým (nejen) za umožnění studia na PřF UK, J. Žaludovi a L. Morávkovi za technické rady a L. Možíšovi za půjčení PC.

# 1 ÚVOD

Solné zvětrávání představuje soubor procesů, které tvoří významný zvětrávací mechanismus. V posledních letech významně stoupá zájem vědců o studium jevů s ním spojených, zejména v souvislosti s poškozením stavebních památek a materiálů, kde hraje dominantní roli.

Krystalizace a opětovné rozpouštění solí je považováno za jeden z činitelů modelace horninového povrchu a vzniku erozních tvarů (Goudie a Viles 1997). Vliv solí se uplatňuje zejména v městském prostředí (Winkler 1994) a pískovcových skalních městech, kde převládá jejich depozice nad vymýváním (Cílek 1998).

Přítomnost solí v životním prostředí je rozšířeným fenoménem, který do určité míry souvisí s jeho rostoucím antropogenním zatížením. Složení solných krust a výkvětů tak odráží v regionálním měřítku poměry okolního prostředí.

České Švýcarsko je nejmladším národním parkem v České republice, na jehož stavbě se hlavní měrou podílejí svrchnokřídové křemenné pískovce bohaté na nejrůznější zvětrávací formy v mikro, mezo i makroměřítku. Tato oblast se mimo jiné vyznačuje zvýšenou tvorbou solných výkvětů na skalním povrchu. Okolí Děčína, ve kterém se park nachází, bylo po několik desetiletí vystaveno velmi vysoké imisní zátěži (Kukal a Reichmann 2000). Dá se proto očekávat, že se toto zatížení projeví i ve složení solných krust a výkvětů.

Jedním z nejméně probíraných aspektů solného zvětrávání je distribuce solí v hornině. Dosavadní výzkumy se zaměřily na různé aspekty přítomnosti solí v horninách a stavebním kameni, jako jsou zdroje solí (Wakefield a kol. 1996, Machill a kol. 1997, Garcia-Valles a kol. 1997, Williams a Robinson 2000, Smith a kol. 2001), vliv krystalizace solí na změny struktury horniny a její fyzikální vlastnosti (Goudie 1999), složení solí ve vztahu ke složení horniny a mobilizaci prvků z ní (Nord a Ericson 1993) nebo vliv okolního prostředí (Sabbioni a Zappia 1992). Proměnlivost prostorového rozložení různých fází byla doposud zkoumána pouze v souvislosti s poškozením kamenných a zděných objektů. Naopak na přirozených výchozech nebyla studována. Stejně tak nebyly na přirozených výchozech souběžně sledovány změny fyzikálních vlastností hornin postižených solným zvětráváním.

Cílem této práce je sledování proměnlivosti distribuce solí přítomných v povrchové vrstvě horniny. Výzkum má ověřit, zda existuje určitá závislost výskytu konkrétních fází jak na výšce, tak i na expozici vůči světovým stranám. Diskutován je rovněž vztah mezi přítomností solí, petrografickými parametry hornin a povrchovými tvary reliéfu (v mikro až mezo měřítku). Naplnění cílů této práce se předpokládá pomocí cíleného vzorkování vybraného přírodního objektu (skalní defilé Křídelní stěny v NP České Švýcarsko), systematického analytického studia (mineralogický fázový výzkum, chemismus solných výkvětů a vodorozpuštěných solí), petrografického studia hornin a sledování změn fyzikálních vlastností horniny.

Studium solného zvětrávání a pochopení dějů s ním spojených je důležité zejména pro snížení nebezpečí poškozování stavebních materiálů a ochranu a zachování kulturních i přírodních památek.



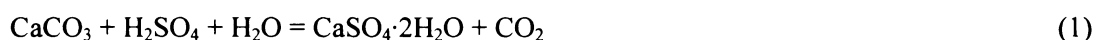
## 2 SOLNÉ ZVĚTRÁVÁNÍ PÍSKOVců

### 2.1 Procesy solného zvětrávání

Solné zvětrávání je souborem několika současně působících procesů, které dohromady tvoří účinný zvětrávací mechanismus (Goudie a Viles 1997). Nejvýznamnější podíl mají fyzikální procesy (Ollier 1969, Winkler 1994), které mohou být často doprovázeny chemickými procesy a činností organismů (Goudie a Viles 1997).

Fyzikální procesy, které se při solném zvětrávání uplatňují, jsou spojeny hlavně s objemovými změnami solí (Winkler 1994). Patří sem krystalizace solí z roztoku, kdy krystalizující sůl může vyvinout v závislosti na teplotě tlaky o velikosti až několika desítek až stovek MPa, které přesahují tahovou pevnost většiny hornin (Goodman 1989). Dalším mechanismem, způsobujícím porušení horniny, je hydratace dehydrovaných forem minerálů, např. anhydritu na stabilnější sádrovec. Při hydrataci dojde přijetím vody ke zvětšení objemu solí, které působí na stěny pórů. Procesy hydratace a dehydratace probíhají v závislosti na změnách teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Nejvýhodnější podmínky, kdy dochází k produkci nejvyšších hydratačních tlaků, jsou spojeny s nízkými teplotami a vyšší relativní vlhkostí vzduchu (Winkler 1994). K zvětrávání může docházet také vlivem rozdílné tepelné roztažnosti solí a horniny. K fyzikálním procesům způsobujícím porušení horniny patří také osmóza. Velikost osmotického tlaku solí závisí na její koncentraci v roztoku, na teplotě a na charakteru membrány (Winkler 1994).

Chemické zvětrávání zahrnuje chemické reakce mezi solemi, vodou a složkami horniny. Nejčastějšími mechanismy jsou rozpouštění, hydratace/dehydratace a krystalizace nových solí. Zdroje agresivních reakčních složek jsou často atmosférické (rovnice 1). Nové složky mohou také vznikat vzájemnými reakcemi mezi jednotlivými solemi (rovnice 2 a 3) (Arnold a Zehnder 1990).



Součástí solného zvětrávání je i zvětrávání biogenní. Hygroskopické soli zvyšují vlhkost stěn, která umožňuje intenzivnější mikrobiální činnost (Cílek a Langrová 1994). Ta je příčinou dalšího zvyšování vlhkosti, obsahu biogenních solí a tím možnosti zachycení nižších rostlin. Na skalním povrchu se vyskytují především mechy, lišejníky, houby, řasy a jiné mikroorganismy, které produkují agresivní organické kyseliny (Krumbein 1993). Některé bakterie, například sirmé (*Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus thioparus*) nebo nitrifikační (*Nitrobacter*, *Nitrosomonas*), přeměňují sloučeniny síry a dusíku na silné minerální kyseliny, které se podílejí na zvětrávání (Winkler 1994). Růst vyšších rostlin může vést také k mechanickému porušování skalních povrchů (Ollier 1969).

### 2.2 Původ solí v hornině

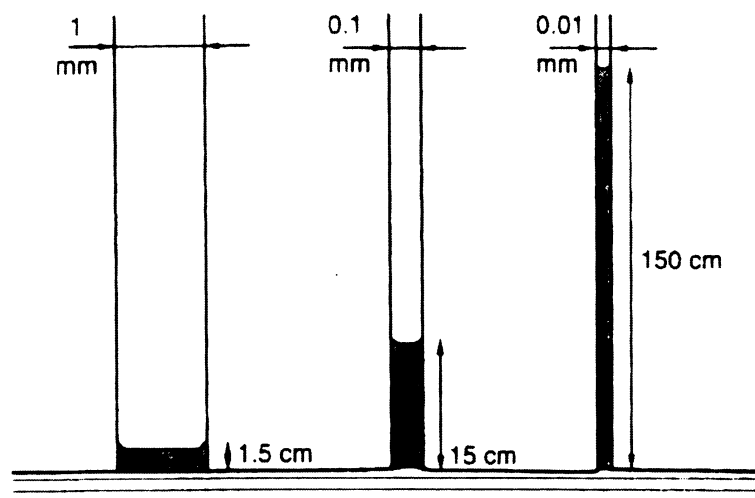
Solí, obsažené v hornině a uplatňující se při solném zvětrávání, mohou být různého původu a vyskytují se v různých koncentracích v závislosti na zdroji. Jejich zdroj je buď přirozený (horninové prostředí, mořská voda) nebo jsou často antropogenního původu.

Některé rozpustné soli vznikají rozkladem součástí hornin. Například sírany mohou být produktem zvětrávání pyritu, vápenatý kation se uvolňuje při rozpouštění karbonátů nebo kationy železa se snadno uvolňují z Fe bohatých hornin. Významným zdrojem solí, zvláště v přímořských oblastech, je mořská voda. Nejčastější mořskou solí je NaCl, který může být přenašen podle Winklera (1994) v aerosolu přes 300 – 500 km do vnitrozemí, kde se usazuje. Bohatým zdrojem solí, hlavně chloridů,

síranů a dusičnanů Na, Mg, Ca nebo P je také podzemní voda (Winkler 1994). Půda a rostliny mohou být zdrojem některých síranů, fosforečnanů a dusičnanů. Jedním z hlavních zdrojů materiálu solí je atmosféra. Například sírany a chloridy se do ní mohou dostat vulkanickou činností, velká část iontů ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , či  $\text{Cl}_2$ ) se do atmosféry dostává antropogenní činností (např. spalováním fosilních paliv) (Longinelli a Bartelloni 1978, Pye a Schiavon 1989, Garcia-Valles a kol. 1997, Siedel a Klemm 2000a,b 2001). Ty jsou pak vymývány dešťovou vodou, nebo se usazují na skalním povrchu jako suchá depozice. Dalšími antropogenními solemi jsou chloridy ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) používané jako posypové soli pro ošetření vozovek a chodníků. Aplikováním umělých hnojiv se do půdy dostávají fosforečnany, dusičnany či sírany.

### 2.3 Pohyb solí v hornině

Soli se pohybují v hornině rozpuštěné v roztocích. Pro jejich pohyb je důležitý přísun vody. Zdrojem vlhkosti v hornině je vertikálně prosakující dešťová voda, vzlínající podzemní voda a srážející se vzdušná vlhkost. V nejširších puklinách a pórech se při pohybu roztoků horninou uplatňuje gravitační síla. Se zmenšováním velikosti pórů se uplatňují více kapilární síly. Dochází ke vzlínání roztoků systémem propojených pórů z podloží do skalní stěny nebo zdiva ve vertikálním i horizontálním směru. Výška vzlínání závisí na průměru kapiláry (Obr. 1). Podle Vose a Tammese (1969) umožňuje průměr pórů v rozsahu od 6 do 20  $\mu\text{m}$  maximální vertikální vzlínání do výšky 3 - 10 m a průměr pórů od 2 do 6  $\mu\text{m}$  vzlínání do výšky 10 - 30 m. V horizontálním směru je dráha kapilárního pohybu vody dvakrát větší než ve směru vertikálním. Kapiláry menší než 0,1  $\mu\text{m}$  už neabsorbují vodu (Winkler 1994). V tenkých kapilárách se uplatňuje osmóza a v nejtenčích všesměrná difúze.



Obr. 1. Závislost výšky vzlínání vody na průměru kapiláry (převzato z Winklera 1994).

### 2.4 Krystalizace solí

Ke krystalizaci solí dochází z nasyceného roztoku na konci kapilárních drah. Krystalizující sůl působí tlakem na stěny pórů. Hodnoty krystalizačních tlaků se pohybují v rozsahu jednotek až stovek MPa. Například krystalizační tlaky dvou nejběžnějších solí, sádrovce a halitu, se pohybují mezi 19 – 28,2 MPa u sádrovce a 5,54 – 373,7 MPa u halitu (Winkler 1994). Velikost těchto tlaků nejvíce ovlivňuje koncentrace solného roztoku, teplota, doba krystalizace, relativní vlhkost prostředí a její změny, rozpustnost solí atd. (Winkler 1994, Zehnder 1996, Goudie a Viles 1997).

Teplota je významným činitelem ovlivňujícím krystalizaci solí z roztoků. Pokles teploty snižuje rozpustnost některých solí (např.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4$  a  $\text{NaNO}_3$ ) a tím umožňuje jejich krystalizaci. Soli krystalizující vlivem snížené teploty mohou dosahovat většího objemu než soli krystalizující vlivem evaporace za stejnou jednotku času (Goudie a Viles 1997). Velikost krystalů závisí hlavně na době krystalizace a koncentraci roztoku. Při nižších koncentracích a delší době krystalizace dorůstají krystaly větších velikostí (Winkler 1994).

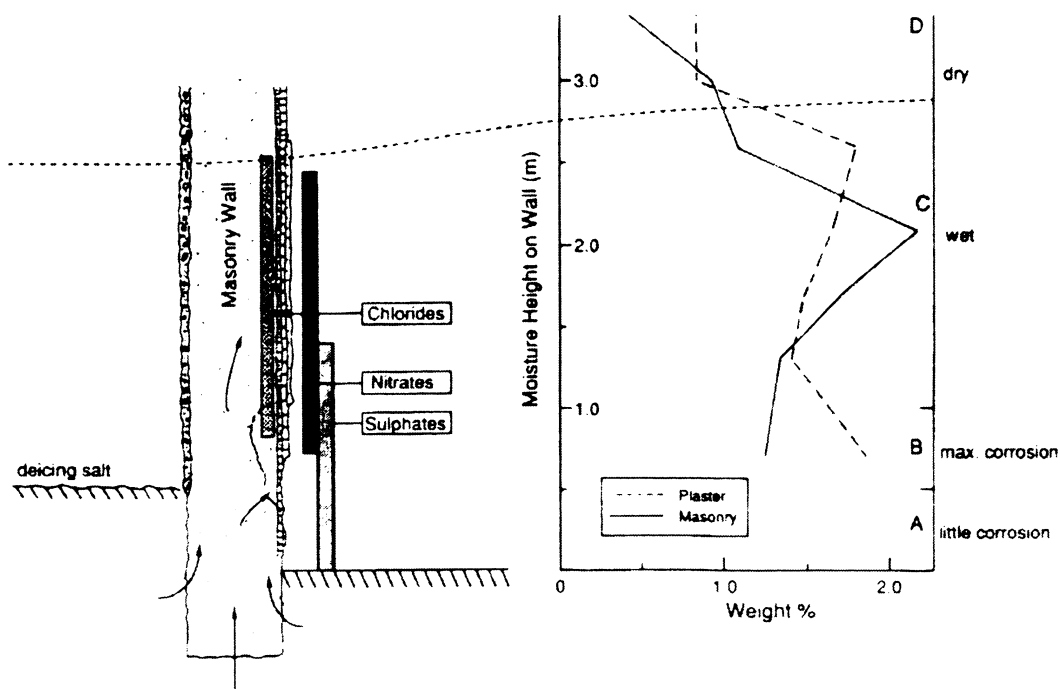
Pořadí, v jakém jednotlivé soli krystalizují z jejich směsného roztoku, je ovlivněno jejich rozpustností. Jako první krystalizují méně rozpustné soli (např. sádrovec), které jsou méně hygroskopické, mohou krystalizovat i za vyšší vlhkosti a nezpůsobují velké porušení horniny (Zehnder 1996). Více rozpustné soli krystalizují později, ve vyšších polohách stěny, jsou více hygroskopické a představují větší riziko poškození (Arnold a Zehnder 1990, Zehnder 1996).

Velikost krystalizačních tlaků je závislá na velikostním zastoupení pórů v hornině (Rossi-Manaresi a Tucci 1991). V hornině s podobným zastoupením malých ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ) a velkých ( $> 0,5 \mu\text{m}$ ) pórů dosahují krystalizační tlaky vyšších hodnot, než v hornině, kde je menší zastoupení malých pórů. Experimentální studium prokázalo (Rodriguez-Navarro a Doehne 1999), že v horninách s bohatým zastoupením mikropórů dochází kvůli velkému povrchu pórů a pomalému transportu spíše ke krystalizaci solí pod povrchem (subflorescenci) a v horninách s velkými póry k tvorbě solných výkvětů (eflorescenci).

Relativní vlhkost vzduchu je velmi důležitým faktorem kontrolujícím efektivitu krystalizace. Sůl krystalizuje tehdy, je-li okolní relativní vlhkost nižší než rovnovážná relativní vlhkost nasyceného roztoku (Goudie a Viles 1997, Laue 1995). Soli s nízkými hodnotami rovnovážné relativní vlhkosti, jako například  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$  či  $\text{CaCl}_2$ , jsou více náchylné k rozpouštění (Goudie a Viles 1997). Vlivem relativní vlhkosti na krystalizaci  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  z roztoku se mimo jiné zabývali Rodriguez-Navarro a Doehne (1999). Podle nich dochází k růstu solných výkvětů při vysoké relativní vlhkosti a nebezpečnějších subflorescenci při nízké relativní vlhkosti. Nízká relativní vlhkost vede totiž ke zvýšení rychlosti vypařování, to znamená, že solný roztok nedosáhne povrchu horniny a bude krystalizovat pod ním.

## 2.5 Distribuce solí v hornině

Zákonitosti distribuce solí v horninách a související změny fyzikálních vlastností horniny patří k nejméně probíraným aspektům solného zvětrávání. Dosavadní práce se zaměřily na profily distribuce solí ve stavebních zděných konstrukcích (Arnold a Zehnder 1990, Laue 1995, Příkryl 2005). Koncentrace solí a s ní související poškození stavebních materiálů klesá od úpatí k vrcholu a ve výšce kolem 2 - 3 m prakticky mizí (Arnold a Zehnder 1990, Laue 1995). V nejnižším horizontu (0 - 0,5 m nad zemí) krystalizují nejméně rozpustné soli doprovázené jen malým poškozením; zatímco ve výšce 0,5 - 1 m dochází ke krystalizaci většiny destruktivních solí, a tudíž také dochází k největšímu poškození horniny (Arnold a Zehnder 1990). Ve výšce nad 1 m krystalizují hygroskopické soli bez větších destruktivních účinků. V závislosti na rozpustnosti by tedy měly soli krystalizovat vertikálně v pořadí sírany - dusičnany - chloridy od báze stěny (Obr. 2).

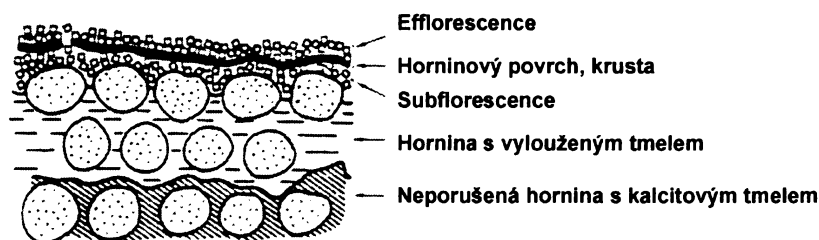


Obr. 2. Výškový profil distribuce solí a zón porušení ve stěně budovy podle Arnolda a Zehndera (1990).

## 2.6 Solné výkvěty (krusty)

### 2.6.1 Efflorescence a subflorescence

Na povrchu horniny ale i zdíva budov nebo soch se často vyskytují bílé až tmavě šedé povlaky solí, typický projev solného zvětrávání. Mohou být buď povrchové, tzv. efflorescence, nebo podpovrchové, tzv. subflorescence (Schmidt-Thomsen 1969) (Obr. 3). Při opadávání solných výkvětů může dojít i k odlupování povrchové vrstvy horniny. Nebezpečnější je krystalizace solí pod povrchem, např. v exfoliačních trhlinách. Ta může způsobit opad až několik cm silné vrstvy horniny.



Obr. 3. Efflorescence a subflorescence (podle Winklera 1994).

### 2.6.2 Složení solných krust

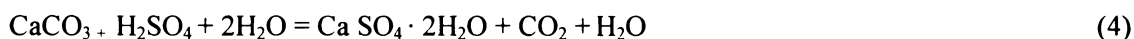
Nejčastějšími druhy solí solných krust jsou sírany, chloridy, dusičnany a uhličitany. Nejběžnějším minerálem solných výkvětů je sádrovec, k běžným patří i síran sodný, chlorid sodný nebo uhličitán sodný (Goudie a Viles 1997). Další minerály, které byly identifikovány v solných krustách, jsou uvedeny v Tabulce 1. Soli solných krust jsou rozpustné, mohou se cyklicky rozpouštět a krystalizovat, některé jsou hygroskopické (např. NaCl) a mohou poutat vzdušnou vlhkost. Chemické a mineralogické složení solných výkvětů závisí často na kombinaci několika faktorů, jakými jsou

například zdroj solných iontů a vody, petrologická charakteristika horniny, složení atmosféry, klima apod.

Tab. 1. Hlavní evaporitní minerály solných krust (převzato z Goudie a Viles 1997).

Název minerálu	Chemický vzorec	Název minerálu	Chemický vzorec
alunit	$(K,Na)Al_3(SO_4)_2(OH)_6$	loewit	$Na_{12}Mg_7(SO_4)_{13} \cdot 15H_2O$
anhydrit	$CaSO_4$	magnesit	$MgCO_3$
antarcticit	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	magneziokalcit	$(Ca,Mg)CO_3$
aphthitalit (glaserit)	$K_2SO_4 \cdot (Na,K)SO_4$	mirabilit	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
aragonit	$CaCO_3$	nahcolit	$NaHCO_3$
arkanit	$K_2SO_4$	natrit	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$
bassanit	$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$	nitramit	$NH_4NO_3$
bischofit	$MgCl \cdot 6H_2O$	nitrokalit	$KNO_3$
bloedit	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	nitratin	$NaNO_3$
burkeit	$Na_2CO_3 \cdot 2Na_2SO_4$	nitrokalcit	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$
darapskit	$Na_3(NO_3)(SO_4) \cdot H_2O$	nitromagnesit	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
dolomit	$CaMg(CO_3)_2$	northupit	$Na_2Mg(CO_3)_2Cl$
epsomit	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	pentahydrit	$MgSO_4 \cdot 5H_2O$
ettringit	$CaAl_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$	picromerit	$K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
gaylussit	$CaCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 5H_2O$	pirssonit	$CaCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 2H_2O$
gauberit	$Na_2Ca(SO_4)_2$	polyhalit	$2CaSO_4 \cdot MgSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot 2H_2O$
halit	$NaCl$	rinneit	$NaK_3FeCl_6$
hanksit	$Na_2K(SO_4)_9(CO_3)_2Cl$	rosenit	$FeSO_4 \cdot 4H_2O$
heptahydrit	$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$	sádrovec	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
hexahydrit	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	sanderit	$MgSO_4 \cdot 2H_2O$
humberstonit	$K_3Na_7Mg_2(SO_4)_6(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	shoenit (picromerit)	$MgSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot 6H_2O$
huntit	$Mg_3Ca(CO_3)_4$	shortit	$2CaCO_3 \cdot Na_2CO_3$
hydrohalit	$NaCl \cdot 2H_2O$	sylvit	$KCl$
jarosit	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	syngenit	$CaSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot H_2O$
kainit	$MgSO_4 \cdot KCl \cdot 3H_2O$	tachyhydrit	$CaCl_2 \cdot 2MgCl_2 \cdot 12H_2O$
kalicinit	$KHCO_3$	thenardit	$Na_2SO_4$
kalcit	$CaCO_3$	thermonatrit	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$
karnalit	$KMgCl_3 \cdot 6H_2O$	trona	$Na_3(CO_3)(HCO_3) \cdot 2H_2O$
kieserit	$MgSO_4 \cdot H_2O$	ulexit	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$
langbeinit	$K_2Mg_2(SO_4)_3$	vanthoffit	$MgSO_4 \cdot 3NaSO_4$
leonhardtit	$MgSO_4 \cdot 4H_2O$	weddellit	$CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$
leonit	$MgSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot 4H_2O$	whewellit	$CaC_2O_4 \cdot H_2O$

Nejběžnější minerál solných krust, sádrovec, vzniká sulfatací. Zdrojem aniontů je vzdušný  $SO_2$ , který na vlhkém horninovém povrchu reaguje na  $H_2SO_4$ . Ta poté reaguje s horninou obsahující  $CaCO_3$  podle následující reakce (rovnice 4):



Sádrovec může vznikat i bez přítomnosti vody, jen s přijetím vzdušné vlhkosti, podle mechanismů, které navrhli Cooke a Gibbs (bez datace) (Goudie a Viles 1997).  $SO_2$  může reagovat přímo s  $CaCO_3$  za vzniku dihydrátu siřičitanu vápenatého (rovnice 5). Vzniklý  $CaSO_3 \cdot 2H_2O$  se pak následně oxiduje za přítomnosti katalyzátorů na sádrovec.  $SO_2$  může také reagovat s  $Ca(HCO_3)_2$ , který vzniká reakcí karbonátu s vodou bohatou  $CO_2$ , za vzniku siřičitanu vápenatého (rovnice 6).





### 2.6.3 *Chemismus a fázové složení solných krust v české křídové pánvi*

Výzkumem solných výkvětů se v českých zemích zabývali různí autoři jak ve vztahu k poškození památek (Buzek a kol. 1991, Příkryl a kol. 2004), tak z hlediska zvětrávání výchozů hornin v přirozeném prostředí (Beyer 1911, Blanck a Evila 1932, Breiter 1976, Cílek 1993, Cílek a Langrová 1994, Soukupová a kol. 2002a, Holeček 2004).

Nejčastějším minerálem solných krust české křídové pánve je sádrovec (Cílek 1993, Cílek a Langrová 1994, Příkryl a Soukupová 2001, Soukupová a kol. 2002a, Holeček 2004), který byl nalezen ve všech jejích částech.

Pro severní a západní část křídové pánve je typický výskyt Al-bohatých síranů. V kvádrových pískovcích svrchní křída severních Čech (cenoman u Malé Skály, střední turon u Bukovce v Polomených horách, coniak jizerské křída) byl identifikován  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ve směsi s čermíkitem ( $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), popřípadě s pickeringitem ( $\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ ) (Breiter 1976). V labských pískovcích byl nalezen čermíkit (Breiter 1976) a alunit ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) (Cílek a Langrová 1994). Solné výkvěty z NP České Švýcarsko obsahují převážně síranový aniont, kationty  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  a  $\text{Fe}^{2+}$  (1 - 10 hm. %), příměsí organických substancí, Fe-hydroxidu a místy opálu (Cílek a Langrová 1994). Ve skalních městech Českého Švýcarska a Českého ráje byl kromě sádrovce a ( $\text{K}$ ,  $\text{NH}_4$ )  $\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  identifikován také novotvořený síran syngenit ( $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (Soukupová a kol. 2002a).

V jihozápadní části křídové pánve jsou také časté K-Al bohaté sírany. Cílek (1993) identifikoval v solných výkvětech Kokořínska kromě sádrovce také alunit ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) a arkanit ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Oproti tomu v solných výkvětech východočeské křída byl kromě sádrovce, kalcitu a křemene identifikován thenardit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), syngenit ( $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) a hexahydrid ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Holeček 2004).

## 2.7 **Další faktory ovlivňující solné zvětrávání**

Solné zvětrávání hornin je stejně jako všechny zvětrávací procesy ovlivněno mnoha různými faktory, mezi které patří vlastnosti horniny (geneze, fyzikální vlastnosti, chemismus a mineralogické složení) a vlastnosti jejího okolního prostředí (klíma, geografické parametry, přítomnost a zdroj vody, zdroj soli, vliv člověka, složení atmosféry atd.).

### 2.7.1 *Klimatické faktory*

Klíma oblasti ovlivňuje sílu zvětrávacích procesů i složení a distribuci solí. V aridních oblastech se uplatňuje více zvětrávání fyzikální, zatímco chemické a biologické zvětrávání převládá ve vlhkém klimatu. V extrémně aridních oblastech převládají soli s vysokou rozpustností. Příkladem je převaha nitrátů v poušti Atacama s ročním průměrným úhrnem srážek pod 1 mm (Goudie a Viles 1997).

Relativní vlhkost, teplota vzduchu, teplota povrchu horniny a jejich změny ovlivňují krystalizaci a hydrataci nebo dehydrataci solí. Laue (1995) zkoumal vliv pokojového klimatu na výskyt solí v kryptě St. Maria v Kapitole. Zjistil, že v nejlhčích letních měsících dochází k rozpouštění solí, zatímco od listopadu se začátkem vytápění roste krystalizace solí až do dubna, kdy objevil největší poškození stěn.

Složení a výskyt solných výkvětů může být také ovlivněn roční dobou. Breiter (1976) uvádí postupný pokles podílu čermikitu ( $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) ve směsi s  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  v období od srpna do prosince, kdy se s postupným ustáváním tlení zmenšuje přísun  $\text{NH}_4^+$  iontů.

### 2.7.2 *Vlastnosti horniny*

Genetický vývoj horniny má vliv na její stavbu a minerální složení. Stupeň kompakce horniny ovlivňuje její odolnost vůči zvětrávání. Přítomnost puklin, které například v kvádrových pískovcích sledují zpravidla směry tektonických linií území (Balatka a Sládek 1984), má vliv na transport vody a solných roztoků v hornině. Podle Balatky a Sládka (1984) je pro zvětrávání kvádrových pískovců důležitý také ráz vrstevnatosti.

Mineralogické složení horniny ovlivňuje její chemismus a odolnost vůči zvětrávání. Ta závisí na stabilitě přítomných minerálů v okolních podmínkách prostředí.

Fyzikální vlastnosti hornin, mezi které patří pórovitost, vlhkost, nasákavost, měrná a objemová hmotnost nebo mechanické a tepelné vlastnosti horniny, ovlivňují její náchylnost vůči zvětrávání. Například nárůst pórovitosti vede ke zhoršení mechanických vlastností horniny (Goudie 1999). Velikost, propojení a distribuce pórů určují stabilitu horniny, obsah vody a její migraci. Horniny s velkým objemem velkých i malých pórů jsou citlivější vůči solnému a mrazovému zvětrávání (Goudie a Viles 1997, Rossi-Manaresi a Tucci 1991, Rodriguez-Navarro a Doehne 1999). Oproti tomu u hornin s nízkým zastoupením malých pórů způsobuje krystalizace solí spíše povrchové zpevnění než porušení (Rossi-Manaresi a Tucci 1991).

### 2.7.3 *Geografické parametry*

Řada studií ukázala, že složení a výskyt solných výkvětů na skalní stěně i na památkách exponovaných v městském prostředí je závislé na geografické expozici (Halsey a kol. 1996) a na míře vlastní expozice kamenů vůči zvětrávacím vlivům (Steger a Mehner 1998). Breiter (1976) uvádí snížený obsah čermikitu na severních a západních stěnách lokality Bukovec, kde je pro svou vyšší rozpustnost snadněji vymýván.

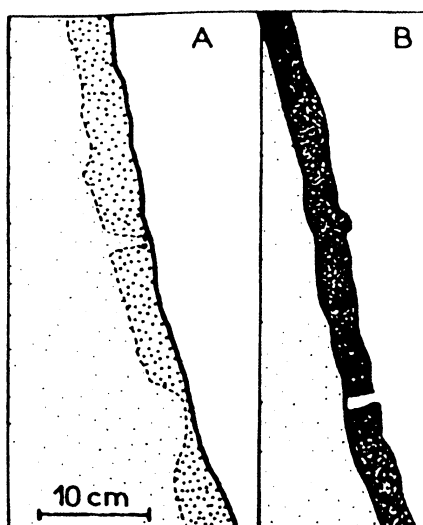
### 2.7.4 *Složení atmosféry*

Složení atmosféry, zvláště její kontaminace oxidy síry a dusíku a jinými polutanty, je zásadním faktorem ovlivňujícím chemické zvětrávání. Oxidy dusíku a oxid siřičitý se účastní různých chemických reakcí, které mohou vést k hromadění solí a ke zvýšení solného zvětrávání. Například  $\text{SO}_2$  reaguje s horninou obsahující  $\text{CaCO}_3$  za vzniku nejčastějšího minerálu solných výkvětů, sádrovce (rovnice 4).

Některé polutanty jsou součástí solných výkvětů jako částičky sazí nebo prachu, a mohou být katalyzátory reakce vzniku sádrovce. Rodriguez-Navarro a Sebastian (1996) potvrdili ve svých studiích katalytickou roli uhlíku obsaženého v sazích a kovových částic z výfukových plynů. Významnými katalyzátory mohou být také atmosférické oxidanty jako ozón a  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Goudie a Viles 1997). Oxidy dusíku přispívají k solnému zvětrávání dvěma způsoby: v přítomnosti vody mohou být oxidovány na  $\text{HNO}_3$ , která může reagovat s karbonáty za vzniku vysoce rozpustných solí, navíc zvyšují adsorpci oxidů síry na skalním povrchu (Goudie a Viles 1997). Vlivem zvýšené kyselosti srážek dochází k rozkladu živců a jílových minerálů, vyluhování alkálií ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) a  $\text{Al}^{3+}$  a k tvorbě nových, často agresivních síranů (Čílek 1998).

### 2.7.5 Povrchové zpevňování - vznik skalních kůr

Krystalizace solí a srážení  $\text{SiO}_2$  může při splnění určitých podmínek vést k tzv. povrchovému zpevnění horniny (angl. case hardening) (Snethlage 1984, Winkler 1994), neboli vzniku skalních kůr (Zvelebil a kol. 2002). Skalní kůra je povrchová, druhotně zpevňovaná vrstva horniny o mocnosti několika mm až desítek cm (Obr. 5). Cílek (1997), Cílek a Langrová (1994) rozlišují 2 typy skalních kůr. Vnitřní endokrusty, vzniklé převážně druhotnou silicifikací a vnější exokrusty, tvořené povlakem tmavé barvy složené z Fe-hydroxidů (Obr. 4). Vznik skalních kůr může být do určité míry antagonistickým procesem solnému zvětrávání, neboť chrání pískovcový povrch. Zároveň ale dochází kvůli výparnému transportu uvnitř horniny k hromadění solí a vlhkosti pod méně propustnou skalní kůrou. Při poklesu vlhkosti dochází ke krystalizaci solí a odlupování skalních kůr. Cílek a Langrová (1994) například pozorovali odlupování skalních kůr v podobě mohutných 2 – 10 cm mocných skalních ploten v centru NP České Švýcarsko poblíž Pravčické brány.



Obr. 4. A: Vnitřní skalní kůra, endokrusta, tvořená obvykle druhotnou silicifikací. B: Vnější skalní kůra, exokrusta (podle Cílka a Langrové 1994, Cílka 1997).



Obr. 5. Vnitřní skalní kůra ve svrchnokřídovém křemenném pískovci Křídelních stěn v NP České Švýcarsko (stěna VII). Méně odolnější podložní části horniny byly odneseny procesem drolivého rozpadu (foto R. Příkryl).



## 2.8 Morfologické projevy zvětrávání na skalním povrchu

Skalní povrch pískovcových stěn bývá často tvořen voštinami, skalními dutinami a výklenky, římsami a lištami. Voštiny jsou jamkovité prohlubně o velikosti několika mm až cm (Rubín a kol. 1986, Pye a Mottershead 1994), které místy vytváří celé soustavy (mřížování). Jednotlivé jamky jsou od sebe odděleny různě silnými mezistěnami z odolnějšího materiálu (Rubín a kol. 1986).

Voštiny se vyskytují na svislých a převislých skalních stěnách (Rubín a kol. 1986), zvláště v nižších partiích (Novák 1914), téměř se nevytvářejí na stěnách šikmých a nejlépe bývají vyvinuty v zóně lesa (Cílek a Langrová 1994) a tam, kde je stěna zastíněna stromy (Novák 1914). Voštiny vznikají nejčastěji v klastických sedimentech, hlavně pískovcích, arkózách a slepencích (Rubín a kol. 1986), objeveny však byly i v granitech (Mustoe 1982), vápencích, serpentinitech či ledu (Rubín a kol. 1986). Vyskytují se ve všech klimatických pásmech, velmi rozšířené jsou v aridních oblastech (Goudie a Viles 1997). Běžné jsou v kontinentálních i pobřežních oblastech (Young 1987, Pye a Mottershead 1995). Mikuláš (2001a) se domnívá, že vznik voštin na pobřežích je podmíněn jinými ději než ve vnitrozemí a voštiny se liší i morfologií.

Literatura zabývající se voštinovým zvětráváním je poměrně obsáhlá, vznik voštin však není dosud zcela uspokojivě vysvětlen (Goudie a Viles 1997). Bylo navrženo několik různých mechanismů jejich vzniku. Dříve byly voštiny považovány za produkt větrné eroze (Futterer 1899), proto byly původně nazývány „aeroxysty.“ Dnes je jejich výlučně eolický původ pokládán za mylný (Mikuláš 2001a,b) a je zřejmé, že vznikají kombinací několika různých faktorů (Cílek a Langrová 1994, Turkington 1998, Rodriguez-Navarro a kol. 1999, Mikuláš 2001a). Dalším navrženým mechanismem vzniku bylo chemické zvětrávání (Pye a Mottershead 1994). Kromě zvětrávání se na vzniku voštinového reliéfu podílel také povrchové zpevňování (Winkler 1994, Cílek a Langrová 1994, Mikuláš 2001a,b).

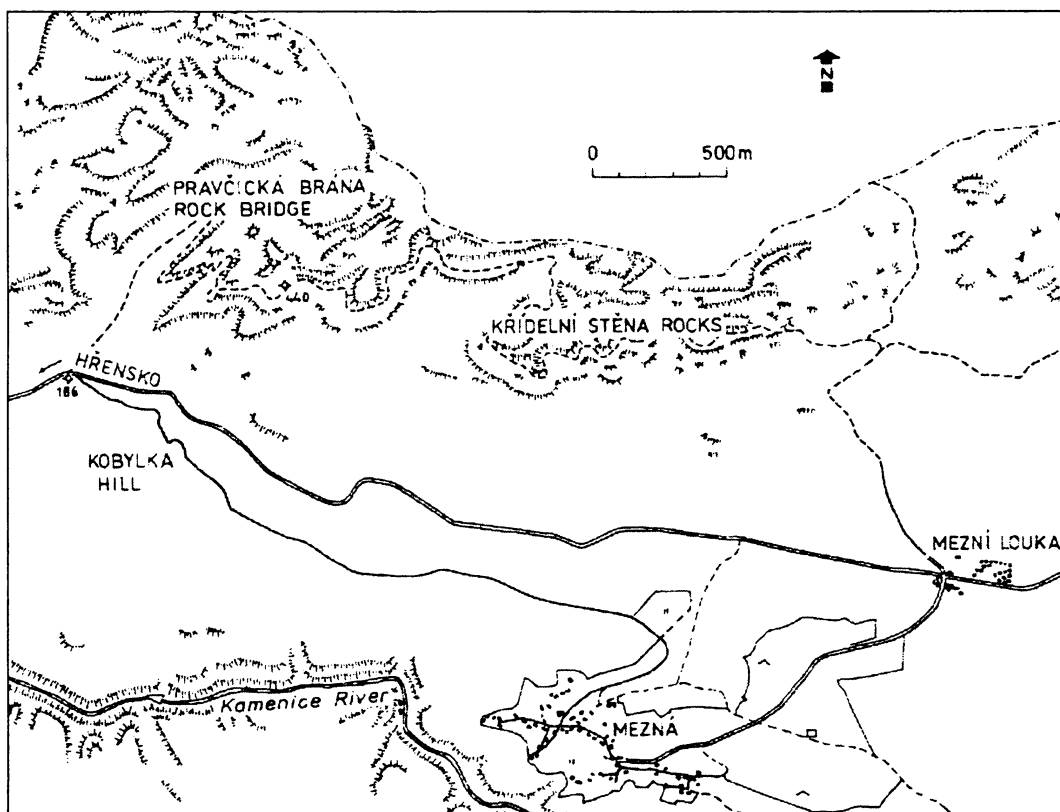
Vznik voštin je často vykládán jako důsledek solného zvětrávání (Mustoe 1982, Young 1987, Goudie a Viles 1997). Young (1987), Pye a Mottershead (1995) uvádí, že větší význam pro desintegraci zrn uvnitř voštin a kaveren má zvýšené rozpouštění křemene, způsobené solemi obsaženými v prosakující vodě, než krystalizační a hydratační tlaky solí. Naopak Winkler (1994) tvrdí, že přítomnost solí není pro formování voštin podmínkou, může pouze urychlit proces zvětrávání. Cílek a Langrová (1994) považují voštiny za důsledek kombinace solné eroze, biogenního zvětrávání a vlivu vlhkosti. Mikuláš (2001 a,b) uvádí kromě solného zvětrávání jako významné parametry ovlivňující vznik a morfologii voštin gravitaci, horninový tlak, pórovitost, pevnost tmele a velikost zrn, kdy velikost voštin se zvyšuje s velikostí zrna pískovce. Důležitou roli kromě přítomnosti solí, litologie a struktury hornin hrají také mikroklimatické změny (Turkington 1998). Experimentální data (Rodriguez-Navarro a kol. 1999) ukazují vliv větru a krystalizace solí na tvorbu voštin. Proudění vzduchu podporuje výpar a tím růst krystalů solí mezi zrny horninového povrchu. Výsledkem je tvorba malých, náhodně rozmístěných dutinek.

Dalšími navrženými mechanismy vzniku voštin byly například teplotní variace (Klear 1956) nebo vlhkostní variace hornin bohatých na jílové minerály (Dragovich 1969).

### 3 STUDOVANÉ ÚZEMÍ

#### 3.1 Geografická poloha

Studovaným územím jsou Křidelní stěny (456 m), tvořící výrazné skalní defilé, které se nachází v 1. zóně Národního parku (NP) České Švýcarsko, mezi Pravčickou bránou a obcí Mezní Louka (Obr. 6), na červené turistické trase zvané „Gabrielina stezka.“



Obr. 6. Náčrt mapky ukazující polohu Křidelních stěn, Pravčické brány a Mezní Louky (převzato z: Valečka in Kříž ed. 2000).

NP České Švýcarsko byl vyhlášen 1. ledna 2000, a stal se tak čtvrtým, nejmladším národním parkem v České republice. Leží na pravém břehu řeky Labe, podél státní hranice se SRN (Obr. 7), a zabírá plochu 79,2 km<sup>2</sup>. Na severu sousedí s NP Saské Švýcarsko, vyhlášeným roku 1991 o rozloze 93 km<sup>2</sup>. Na jihu hraničí s CHKO Labské pískovce a na východě navazuje na CHKO Lužické hory. Předmětem ochrany je nejen unikátní morfologie pískovcových skalních měst, pestrost i rozměry tvarů a forem reliéfu, ale také výskyt vzácné fauny a flóry.



Obr. 7. Mapa ukazující polohu NP České Švýcarsko, NP Saské Švýcarsko a sousední chráněné krajinné oblasti ([http://www.npcs.cz/public/npcs\\_cs/cz.htm](http://www.npcs.cz/public/npcs_cs/cz.htm)).

Geograficky patří NP České Švýcarsko do celku Děčínská vrchovina, která se zde dělí na Růžovskou vrchovinu a Jetřichovické stěny (Balatka a Sládek 1980). V několika výběžcích sem zasahuje plochou asi 2 km<sup>2</sup> také Šluknovská pahorkatina (Valečka 2000). Na území CHKO Labské pískovce zasahují okrajově sousední geomorfologické jednotky - Krušné hory na západě a České středohoří na jihu.

Celá oblast Českosaského Švýcarska tvoří specifický geologicko-morfologický celek, který se od ostatních pískovcových oblastí české křídové pánve liší zejména existencí hlubokých soutěsek a mohutného kaňonu Labe, které jsou v kontrastu s výraznými stolovými horami na saské straně území a vysokými skalními stěnami a plošinami. Nejvyšším bodem celého Českosaského Švýcarska je stolová hora Děčínský Sněžník (726 m n. m.), nejnižším Hřensko (117 m), které je zároveň nejnižším bodem ČR. Nejvýraznější vulkanickou elevací Českého Švýcarska je Růžovský vrch (619 m n. m.). Nejrozsáhlejší souvislý komplex pískovcových skal tvoří Jetřichovické stěny, jehož součástí jsou například Stříbrné, Matzseidelovy či Křídelní stěny.

## 3.2 Geologie území

### 3.2.1 Geologické podloží

Podloží je tvořeno horninami lužického masívu, který vznikl od mladšího proterozoika do staršího paleozoika během několika etap hlubinné magmatické činnosti kadonské (před 570 mil. lety) a variské (před 280 mil. lety) orogeneze. Nejstaršími magmatickými horninami je biotitický granodiorit, jehož stáří bylo určeno až na 700 mil. let (Valečka ed. 1997). Mladší jsou granity staršího paleozoika a k nejmladším patří žíly porfyrů, doleritů, aplitických granitů a křemene, které pronikají staršími granity a granodiority. Metamorfované horniny se přímo na území NP nenacházejí, byly rozrušeny a odneseny na rozhraní staršího a mladšího paleozoika (Valečka 2000). U Jetřichovic byly pomocí vrtů objeveny zbytky pláště lužického masívu tvořené metamorfovanými horninami – fylity (Valečka ed. 1997).

### 3.2.2 Platformní pokryv

Platformní pokryv je tvořen permskými, jurskými, křídovými a terciárními sedimenty, terciárními vulkanity a kvartérními sedimenty.

- *Paleozoikum – perm*

Permské sedimenty jsou staré asi 270 až 280 milionů let (Valečka ed. 1997, Valečka 2000) a jsou výsledkem suchozemské (říční a jezerní) sedimentace doprovázené povrchovým vulkanismem. Patří mezi ně pískovce a prachovce s polohami vulkanických hornin, které se zde dochovaly po 120 milionů let dlouhém období eroze a denudace povrchu pouze v malé tektonické kře u lužického zlomu v okolí Brtníků a Vlčí hory.

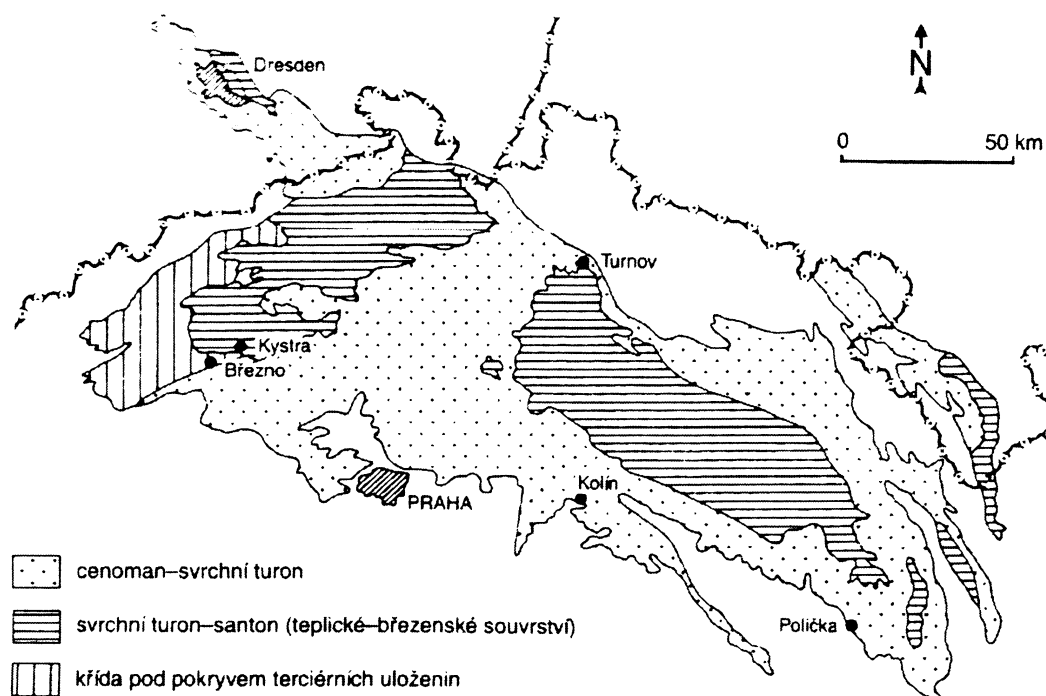
- *Mezozoikum – jura a křída*

Jurské sedimenty jsou výsledkem sedimentace v mělkém teplém moři před 150 – 155 miliony lety, kdy docházelo k ukládání pískovců, vápenců a dolomitů. Většina z nich byla odstraněna po ústupu moře v období 50 milionů let dlouhé denudace. Dochovány byly pouze v několika malých tektonických krách podél lužického zlomu, např. u obce Doubice (Vápenný vrch) či v údolí Bílého potoka (Valečka ed. 1997, Valečka 2000).

Křída je nejvýznamnějším geologickým obdobím pro České Švýcarsko. Jeho území je součástí české křídové pánve, největší dochované sedimentační pánve na území České republiky. Sedimentační pánev vznikla podél tektonicky oslabené zóny labské linie směru SZ-JV, je 290 km dlouhá a zaujímá severní část Českého masivu o ploše asi 14 600 km<sup>2</sup> (Chlupáč a kol. 2002) (Obr. 8). V počátečním stádiu byla vyplňována sladkovodními sedimenty. Na počátku svrchní křídý (cenoman, před 92 miliony lety) došlo k mořské transgresi, která trvala asi 10 - 12 milionů let (Chlupáč a kol. 2002, Valečka ed. 1997, Valečka 2000) až do období santonu. V mělkém a teplém moři docházelo k ukládání sedimentů o původní mocnosti kolem 1100 m. Výplň pánve tvoří různě zrnité klastické uloženiny, ale i slíny, slínovce, opuky a vápence. Na území pánve se vyskytují 2 základní typy facií (Chlupáč a kol. 2002):

- Facie kvádrových pískovců, kam zasahoval přínos písčitého materiálu z pevniny.
- Facie vápnitých jílovců a slínovců s přechody do jílových vápenců, kde byl přínos písčitého materiálu omezený vzdáleností od pobřeží.

Území Českého Švýcarska náleží k lužickému vývoji české křídové pánve, to znamená převahu pískovců nad jinými typy sedimentů díky dostatečnému přínosu písčitého materiálu ze souše, kterou byl tzv. západosudetský ostrov, tvořený horninami lužického plutonu a krystalinika (Chlupáč a kol. 2002, Valečka ed. 1997). Tyto sedimenty se obecně nazývají kvádrové pískovce a jsou tvořeny cyklicky zvrstvenými pískovcovými tělesy o mocnosti až několika set metrů s typickou kvádrovou odlučností, která společně s litologickým vývojem způsobuje jejich náchylnost k hloubkové erozi. Pískovce jsou zde tvořeny obvykle více než 90 % křemene, zbytek tvoří jílovitá příměs, zrnka žilců a slídy, těžké minerály (rutil, zirkon, turmalín) a křemitý tmel, místy s příměsí oxidů železa (Valečka ed. 1997, Valečka 2000, Vařilová 2002). Kvádrové pískovce Děčínské vrchoviny tvoří mohutnou kru, která se sklání pod úhlem do 3° k S – SZ (Balatka a Sládek 1984).



Obr. 8: Schematická geologická mapa české křídové pánve (převzato z Chlupáč a kol. 2002).

Křídové sedimenty se dělí podle horninového složení na pět místních stratigrafických jednotek, nejstarší perucko-korycanské souvrství (cenoman) až březenské souvrství (coniac) (Obr. 9). Jemnozrnější sedimenty, slínovce a jílovité prachovce, tvoří bázi souvrství bělohorského (spodní turon) a teplického souvrství (svrchní turon – coniac). Největší mocnosti, až 350 – 420 m, dosahuje jizerské souvrství (střední – svrchní turon), které tvoří převážnou většinu území NP. Vyznačuje se střídáním několika do nadloží hrubnoucích progradačních cyklů o různé mocnosti, kdy jemnozrné pískovce přecházejí v pískovce střednězrné a poté hrubozrné, případně až ve slepence (Valečka 1989).

- *Terciér*

Po ústupu křídového moře nastalo období denudace, doprovázené vulkanismem a tektonickými deformacemi. Denudací došlo k odstranění většiny produktů povrchového vulkanismu a sedimentů svrchní části březenského souvrství. Na území Českého Švýcarska zůstala drobná roztroušená vulkanická tělesa tvořící výplně sopouchů a subvulkanická tělesa. Z vulkanitů převládají komínovité brekcie a bazaltové horniny (Valečka ed. 1997). Během třetihor (v období od konce křídý až do konce čtvrtohor) dochází k tektonickým deformacím, vázaným na saxonskou tektogenezi, kdy došlo ke vzniku zlomu a vrás, viditelných hlavně v křídových sedimentech (Valečka ed. 1997). Z terciérních sedimentů se v okolí NP České Švýcarsko vyskytují místy pouze pliocénní písčité šterky říčních teras.

- *Kvartér*

Z kvartérních sedimentů jsou na území Českého Švýcarska dochované písčité sedimenty říčních teras, např. podél soutoku Kamenice a Chřibské Kamenice (Valečka ed. 1997). Dalšími kvartérními sedimenty jsou sprašové hlíny, vznikající v obdobích glaciálu, a kamenité až balvanité svahové sedimenty.

### 3.2.3 *Tektonický vývoj území*

Tektonické deformace území Českého Švýcarska jsou vázány na saxonskou tektogenezi (svrchní křída – konec čtvrtohor). Nejvýraznější tektonickou poruchou území je lužický zlom. Je to přibližně 110 km dlouhá tektonická linie s orientací SZ – JV, která odděluje křídové sedimenty od lužického masívu. Na zlomu došlo během vývoje k několika etapám pohybů, z nichž nejvýznamnější je vytvoření přesmykového charakteru lužického zlomu v terciéru (paleocén – eocén) (Malkovský a kol. 1974, Valečka ed. 1997), kdy došlo k nasunutí lužického masívu na křídové sedimenty, vztyčení až překocení křídových sedimentů a k vyvlečení jurských vápenců a permských hornin, jejichž reliкty se dochovaly v některých místech podél lužické poruchy. V mladším terciéru (miocén) došlo k poklesu nasunuté kry lužického masívu, díky kterému se na kře dochovaly povrchové vulkanity (Valečka ed. 1997). Významnou tektonickou poruchou území je plochá a nesouměrná vrása – jetřichovická antiklinála, jejíž osa probíhá od JZ k SV až SSV a sklání se k lužickému zlomu (Valečka ed. 1997). Severozápadní rameno vrásky přechází na území Saska do nezvrásněné ploché desky, jihovýchodní rameno je rozbito zlomovým polem, které probíhá od Srbské Kamenice přes Všemily a Jetřichovice ke Kyjovu, kde navazuje na lužický zlom (Valečka ed. 1997).

### 3.2.4 *Geomorfologický vývoj území*

K formaci reliéfu do dnešní podoby začalo docházet po ústupu křídového moře. Terciérní denudací došlo k odstranění většiny vulkanických těles a mladších křídových sedimentů březenského souvrství (slínovce s polohami pískovců). Došlo k vytvoření ploššího krajinného reliéfu s malými výškovými rozdíly. K hlavním změnám členitosti reliéfu docházelo až v závěru třetihor a zejména během kvartéru. Na rozhraní terciéru a kvartéru došlo k obnově tektonického zdvihu území Českého Švýcarska. To mělo společně se střídáním glaciálů a interglaciálů za následek intenzivní hloubkovou říční erozi, až do turonských vrstev kvádrových pískovců (Valečka ed. 1997). Kvartérní hloubkovou erozí, která je ovlivněná charakterem sedimentu (rozpukání, vrstevnatost), společně se selektivním zvětráváním došlo ke vzniku různých forem skalního reliéfu. Z velkých forem to jsou hlavně strukturní plošiny, kaňonovitá údolí (Labe, Kamenice a Křinice) (Vařilová 2002), skalní města a skalní stěny. Z forem mezoreliéfu se zde vyskytují skalní věže, převisy, římsy, brány a okna, místy i skalní hříby a pyramidy. Skalní povrch (mikroreliéf) je tvořen voštinami, skalními dutinami, pseudoškrapy a méně častěji se vyskytují i skalní mísy.

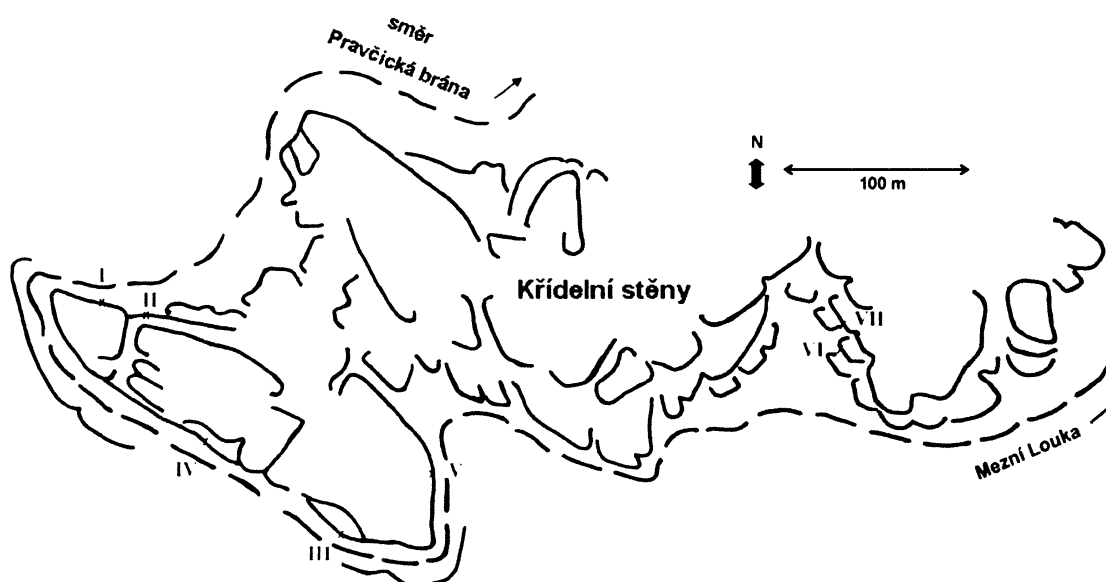
Čas (mil. let) Zeit (Mill. Jahre)	Hlavní geologické procesy Wichtige geologische Prozesse	Mezinárodní stratigrafické jednotky Internationale stratigraphische Einheiten	Hlavní typy hornin (u křidy i místní stratigrafické jednotky) Wichtige Gesteinstypen (bei der Kreide auch lokale stratigraphische Einheiten)	Max. mocnost Max. Mächtigkeit	Schéma geologické stavby Schema des geologischen Aufbaus
0-2	Denudace, Abtragung kontinentální sedimentace, Kontinentale Sedimentation saxonská tektonogéneze, Saxonsche Faltung	ČTVRTOHORY QUARTAR	odvaly, skládky, svahové a říční sedimenty, spraše Halden, Deponien deluviale und fluviatile Sedimente, Löss	20 m	
2-65		TŘETIHORY TERTIAR	vulkanity, říční sedimenty Vulkanite, fluviatile Sedimente	10 m	
65-86					
86-92	mělkomořská, zprvu místy i říční sedimentace  Flachmeer-, lokal zuerst auch fluviatile Sedimentation	DRUHODORY, MESOZOIKUM Svrchní křída, Obere Kreide			
		coniac Coniac	břeženské souvrství: Břežno-Formation: pískovce, Sandsteine	>100 m	
		svrchní turon Oberturon	teplické souvrství: Teplice-Formation: pískovce, prachovce, sílnovce Sandsteine, Schluffsteine, Mergeln	80 m	
		střední turon Mittelturon	jizerské souvrství: Jizera-Formation: křemenné pískovce, Quarzsandsteine	420 m	
		spodní turon Unterturon	bělohorské souvrství: Bílá-Hora-Formation: pískovce, sílnovce Sandsteine, Mergeln	120 m	
		cenoman Cenoman	perucko-korycanské souvrství: Peruc-Korycany-Formation: pískovce, Sandsteine	110 m	
92-140	denudace, zvětrávání Abtragung, Verwitterung	jura Jura	vápence, dolomity Kalksteine, Dolomite	100 m	
140-155	mělkomořská sedimentace Flachmeersedimentation				
155-270	denudace Abtragung	permokarbon Permokarbon	pískovce, jílovce, vulkanity Sandsteine, Tonsteine, Vulkanite	100 m	
270-280	kontinentální sedimentace, vulkanismus Kontinentale Sedimentation, Vulkanismus				
280-400	denudace, horotvorné pochody Abtragung, Gebirgsbildung	starší prvohory a mladší prvohory	Lužický masiv žuly, granodiority, žilné horniny		
400-700	hlubinný magmatismus metamorfóza  Plutonismus Metamorphose	Altpalaeozoikum, Oberproterozoikum	Lausitzer Massiv: Granite, Granodiorite, Ganggesteine		
		FRANOHORY A PRVOHORY PROTEROZOIKUM UND PALAEOZOIKUM			

Obr. 9. Geologický vývoj Českého Švýcarska podle Valečky (1997).

## 4 ODBĚR A PŘÍPRAVA VZORKŮ

### 4.1 Místa odběru

Vzorky horniny a solných výkvětů pro mineralogický a geochemický rozbor byly odebrány ve spodních partiích Křídelní stěny a jejího okolí, která se nachází mezi Pravčickou bránou a obcí Mezní Louka, na červené turistické trase zvané „Gabrielina stezka.“ Studované stěny jsou tvořeny odkryvy svrchnokřídového pískovce jizerského souvrství (Příloha I). Odběr byl proveden se souhlasem Správy NP České Švýcarsko, šetrně a v minimálním množství, s ohledem na to, že se území nachází v 1. zóně národního parku. Lokalita Křídelní stěny byla vybrána, neboť je zde možné nalézt skalní stěny exponované na všechny čtyři světové strany v relativní blízkosti od sebe. Oblast je bohatá na solné krusty a vyskytuje se zde velké množství všech zvětrávacích forem reliéfu. Vzorky solí a hornin byly odebrány v různých úrovních dle dostupnosti, do výšky přibližně 2 – 2,5 metrů nad úroveň terénu, ze čtyř hlavních odběrových míst dle expozice na světovou stranu (Obr. 10). Celkem bylo odebráno 23 vzorků horniny a 31 vzorků solných výkvětů (Tab. 2).



Obr. 10. Schematická mapka odběrových míst (I – VII: místa odběru vzorků, čárkovaná čára: turistická cesta, plná čára: skalní masivy).

#### 4.1.1 Odběr solných výkvětů

Solné výkvěty se vyskytují na povrchu obnažené horniny nebo skalní kůry ve formě až několika mm tenké krusty, drobných krystalků, mazlavých keříčkovitých útvarů nebo jemného prášku. Odběr byl proveden seškrábáním nebo odloupenutím soli z povrchu horniny pomocí dlátka do malého polyetylenového zipového sáčku. Sáček byl popsán číslem lokality, vzorku a výškou odběru nad úrovní terénu. Následovalo zapsání dalších údajů o odběru vzorku do terénního zápisníku, zakreslení do mapy a případná fotodokumentace. Vzorky byly odebrány z povrchu zvětralé obnažené horniny, skalní kůry, uvnitř voštiny nebo skalní dutiny dne 5. října 2005.



#### 4.1.2 Odběr horniny

Ze skalních stěn byly odebrány vzorky horniny zpevněné skalní kůrou nebo zvětralé povrchové vrstvy hornin. Hornina byla odebrána odlomením, někdy otlučením pomocí dláta, v minimálním množství potřebném pro analytické zpracování. Vzorky byly uchovány ve větších polyetylenového zipových sáčcích popsaných číslem lokality, vzorku a výškou odběru. Do terénního zápisníku byly zaznamenány údaje o vzhledu vzorku a místě odběru, které bylo poté zakresleno do mapy.

Tab. 2. Seznam odebraných vzorků, výška odběru a expozice odběrových míst ke světové straně (bližší popis vzorku a místa odběru v Příloze č. II).

vzorek	výška nad terénem	typ vzorku	vzorek	výška nad terénem	typ vzorku
<b>severní stěna I a II</b>			KS/V/3	1,5 m	hornina - profil V
KS/I/1	0,5 m	hornina - profil I	KS/V/4	2 m	hornina - profil V
KS/I/2	1 m	hornina - profil I	KS/V/1a	0,4 - 0,5 m	solný výkvět - profil V
KS/I/3	1,5 m	hornina - profil I	KS/V/2a	1 - 1,1 m	solný výkvět - profil V
KS/I/4	2 m	hornina - profil I	KS/V/3a	1,4 m	solný výkvět - profil V
KS/I/5	2,5 m	hornina - profil I	KS/V/4a	1,7 m	solný výkvět - profil V
KS/II/1a	0,5 - 0,6 m	solný výkvět - profil II	KS/V/5a	1,8 m	solný výkvět - profil V
KS/II/2a	1 - 1,1 m	solný výkvět - profil II	KS/V/6a	2,1 m	solný výkvět - profil V
KS/II/3a	2 - 2,2 m	solný výkvět - profil II	KS/V/7a	5 m	solný výkvět
KS/II/4a	0,5 - 0,6 m	solný výkvět - profil II	KS/V/8a	6 m	solný výkvět
<b>jižní stěna IV</b>			KS/V/9a	6 m	solný výkvět
KS/III/1	1,8 m	hornina + solný výkvět	<b>západní stěna VI</b>		
KS/IV/1	0,35 m	hornina - profil IV	KS/VI/1	0,5 m	hornina - profil VI
KS/IV/2	0,7 m	hornina - profil IV	KS/VI/2	1 m	hornina - profil VI
KS/IV/2.1		hornina - hloubkový profil	KS/VI/3	1,55 m	hornina - profil VI
KS/IV/2.2			KS/VI/4	2 m	hornina - profil VI
KS/IV/2.3			KS/VI/5	2,5 m	hornina - profil VI
KS/IV/2.4			KS/VI/1a	0,7 m	solný výkvět - profil VI
KS/IV/3	1,1 m	hornina - profil IV	KS/VI/2a	1,2 m	solný výkvět - profil VI
KS/IV/4.1	1,6 m	hornina - profil IV	KS/VI/3a	1,5 - 1,6 m	solný výkvět - profil VI
KS/IV/4.2	1,6 m	hornina - profil IV	KS/VI/4a	2 - 2,1 m	solný výkvět - profil VI
KS/IV/5	1,9 m	hornina - profil IV	KS/VI/5a	2,8 m	solný výkvět - profil VI
KS/IV/1a	0,35 m	solný výkvět - profil IV	<b>západní stěna VII</b>		
KS/IV/2a	0,7 m	solný výkvět - profil IV	KS/VII/1	0,6 - 0,7 m	hornina - stěna VII
KS/IV/3a	1,1 m	solný výkvět - profil IV	KS/VII/1a	0,4 m	solný výkvět - profil VII
KS/IV/4a	1,5 m	solný výkvět - profil IV	KS/VII/2a	0,5 m	solný výkvět - profil VII
KS/IV/5a	1,8 - 1,9 m	solný výkvět - profil IV	KS/VII/3a	0,8 m	solný výkvět - profil VII
KS/IV/6a	2,1 - 2,2 m	solný výkvět - profil IV	KS/VII/4a	1 m	solný výkvět - profil VII
<b>východní stěna V</b>			KS/VII/5a	1,6 m	solný výkvět - profil VII
KS/V/1	0,5 m	hornina - profil V	KS/VII/6a	2,1 m	solný výkvět - profil VII
KS/V/2	1 m	hornina - profil V			

## 4.2 Příprava vzorků

### 4.2.1 Příprava vzorků pro stanovení fyzikálních vlastností horniny

Pro stanovení měrné hmotnosti pyknometrickou metodou se na vzduchu vysušená hornina rozdrtila a prosila sítím o velikosti ok 0,125 mm. Rozdrcený materiál se nechal vysušit do konstantní hmotnosti v elektrické sušárně při teplotě 105°C. Vzorek se uchovával v exsikátoru.

Pro stanovení objemové hmotnosti s použitím hydrostatických vah se na vzduchu vysušený vzorek nepravidelného tvaru zvážil ( $m$ ) a poté obalil parafínem (měrná hmotnost parafínu  $\rho_p = 0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

Pro stanovení nasákavosti se vzorek vysušil v elektrické sušárně při teplotě 105°C do ustálené hmotnosti a určila se jeho hmotnost (provedeno v Laboratoři mechaniky zemin ÚSMH, pí. Straková).

### 4.2.2 Příprava vzorků pro určení pórovitosti vysokotlakou rtuťovou porozimetrií

Pro měření v automatickém porozimetru byly připraveny kusové vzorky horniny o velikosti přibližně  $5 \times 5 \text{ mm}$ . Poté byl pórový systém vysušeného vzorku postupně zaplňován vtlačovanou rtuť při narůstajícím tlaku (provedeno v ÚSMH AVČR, Laboratoř sorpční a porometrické analýzy, laborantka M. Čevelová).

### 4.2.3 Příprava vzorků pro fázovou analýzu pomocí rentgenové difrakční analýzy

Pro práškovou rentgenovou difrakční analýzu byly použity vzorky solných výkvětů. Malé množství vzorku (asi  $\frac{1}{4}$  lžičky) bylo v achátové misce zalito etanolem a rozetřeno tloučkem na analytickou jemnost. Poté byl vzorek nanesen s kapkou etanolu na podložní sklíčko, rovnoměrně rozprostřen a nechán na vzduchu zaschnout (provedla L. Melounová, Geochemická laboratoř ÚGMNZ, PŘF UK).

### 4.2.4 Příprava vzorků pro stanovení obsahu vodorozpustných solí

Pro analýzu vodorozpustných solí byly použity vzorky hornin s obnaženým povrchem nebo skalní kůrou. Navážené množství podrceného vzorku, nejčastěji 1 g se nechalo vyluhovat ve 100 ml deionizované vody po dobu 8-12 hod. Poté se výluh zfiltroval přes membránový filtr. Takto připravený vzorek se analyzoval metodou iontové chromatografie (WATREX Praha, s.r.o.).

### 4.2.5 Příprava vzorků pro optickou mikroskopii a mikroskopii v ultrafialovém světle

Pro použití metody mikroskopie v ultrafialovém světle byly odebrané vzorky hornin nejprve vakuově penetrovány epoxidovou pryskyřicí s fluorescenčním barvivem podle dříve navržené metodiky (Nishiyama a Kusuda 1994, Příkryl 1998), poté z nich byly zhotoveny nezakryté výbrusy (brusírna ČGS, pí. Bláhová). Pro potřeby optické mikroskopie v procházejícím světle byly nezakryté výbrusy zakápnuty inverzním olejem a překryty krycím sklíčkem.

### 4.2.6 Příprava vzorků pro použití elektronové mikroanalýzy

Pro měření metodou elektronové mikroanalýzy (mikrosondy) byly horninové vzorky nejprve vakuově penetrovány epoxidovou pryskyřicí (EpoFix), a poté z nich byly zhotoveny leštěné nezakryté výbrusy (brusírna ČGS, pí. Bláhová). Ty byly následně napařeny ve vakuové napařovačce tenkou vrstvou grafitu (Laboratoř rentgenové mikroanalýzy ČGS, Mgr. Jakub Haloda).

## 5 ANALYTICKÉ ZPRACOVÁNÍ

### 5.1 Přehled použitých metod

Pro výzkum fázového složení solných krust byla použita běžně využívaná metoda práškové rentgenové difrakce (XRD). Zastoupení minoritních složek bylo odvozeno z chemismu stanoveného iontovou výměnnou chromatografií (IEC). Pro studium hornin bylo využito optické mikroskopie v procházejícím a UV světle, která byla doplněna použitím elektronové mikrosondy ve zpětně odražených elektronech. U hornin byly laboratorně stanoveny jejich fyzikální vlastnosti, ze kterých byla vypočítána celková pórovitost. Mikropórovitost byla určena metodou vysokotlaké Hg porozimetrie. Přehled použitých metod ukazuje Tabulka 3.

Tab. 3. Přehled použitých metod u jednotlivých vzorků.

vzorek	fyzi vlastn. hornin	IEC	XRD	optická mikroskopie	Hg porozimetrie	mikrosonda
KS/I/1	X	X		X	X	
KS/I/2	X	X		X	X	
KS/I/3	X	X		X	X	
KS/I/4	X	X		X	X	X
KS/I/5	X	X		X		
KS/II/1a			X			
KS/II/2a			X			
KS/II/3a			X			
KS/II/4a			X			
KS/III/1		X	X			
KS/IV/1	X	X		X		
KS/IV/2	X	X		X	X	X
KS/IV/2.1	X	X				
KS/IV/2.2		X				
KS/IV/2.3		X				
KS/IV/2.4		X				
KS/IV/3	X	X		X	X	
KS/IV/4.1	X	X		X		
KS/IV/4.2	X	X				
KS/IV/5	X	X		X	X	
KS/IV/1a			X			
KS/IV/2a			X			
KS/IV/3b			X			
KS/IV/4a			X			
KS/IV/5a			X			
KS/IV/6a			X			
KS/V/1	X	X		X	X	
KS/V/2	X	X		X	X	
KS/V/3	X	X		X	X	
KS/V/4	X	X		X		
KS/V/1a			X			
KS/V/2a			X			
KS/V/3a			X			
KS/V/4a			X			
KS/V/5a			X			
KS/V/6a			X			
KS/V/7a			X			

KS/V/8a			X			
KS/V/9a			X			
KS/VI/1	X	X		X	X	
KS/VI/2	X	X		X	X	X
KS/VI/3	X	X		X	X	
KS/VI/4	X	X		X		
KS/VI/5	X	X		X	X	
KS/VI/1a			X			
KS/VI/2a			X			
KS/VI/3a			X			
KS/VI/4a			X			
KS/VI/5a			X			
KS/VII/1	X	X		X		
KS/VII/1a			X			
KS/VII/2a			X			
KS/VII/3a			X			
KS/VII/4a			X			
KS/VII/5a			X			X
KS/VII/6a			X			

## 5.2 Určení fyzikálních vlastností hornin

Fyzikální vlastnosti hornin jsou vlastnosti, které popisují jejich hmotu ve vztahu k objemu, vztah mezi fázemi horniny nebo důsledky jejich vzájemného působení (Pauli a Holoušová 1994, Schön 2004). U odebraných vzorků hornin byla stanovena měrná hmotnost, objemová hmotnost, vlhkost, nasákavost a pórovitost. Fyzikální vlastnosti byly stanoveny v Laboratoři mechaniky zemin Ústavu struktury a mechaniky hornin, měření provedla pí. Straková.

### 5.2.1 Měrná hmotnost

Měrná hmotnost je hmotnost objemové jednotky pevné fáze horniny (např. Schön 2004). Pro stanovení byl použit skleněný pyknometr (skleněná nádoba s broušenou zátkou, uvnitř které je kapilára). Pro výpočet je nutné znát hmotnost prázdného pyknometru ( $m_1$ ) a cejchovní hmotnost ( $m_3$ ), což je hmotnost pyknometru naplněného měrnou kapalinou - destilovanou vodou při teplotě 20 °C. Do suchého pyknometru bylo vloženo množství horniny o hmotnosti přibližně 10 g, pyknometr byl zvážen ( $m_2$ ) a tím byla určena hmotnost horniny ( $m = m_2 - m_1$ ). Pyknometr s horninou byl dolit částečně destilovanou vodou a vše bylo povařeno po dobu 30 min. Po vychladnutí na 20 °C byl doplněn destilovanou vodou, zazátkován a zvážen ( $m_4$ ). Poté byla vypočítána hmotnost vytlačené vody ( $m_w = m + m_3 - m_4$ ), objem horniny ( $V = m_w / \rho_w$ , kde  $\rho_w$  je 0,9982 g·cm<sup>-3</sup>) a měrná hmotnost horniny ( $\rho_w = m/V$ ). Celý postup byl opakován ze dvou až tří navážek horniny, výsledná měrná hmotnost horniny ( $\rho_s$ ) je jejich aritmetickým průměrem a je udána v jednotkách g·cm<sup>-3</sup>.

### 5.2.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je hmotnost všech součástí horniny v její objemové jednotce, zahrnuje pevnou, kapalnou i plynnou fázi (Pauli a Holoušová 1994, Schön 2004). Pro stanovení objemové hmotnosti byla nejprve zjištěna hmotnost tělesa bez parafinového obalu ( $m$ ). Poté se horninové těleso obalené parafinem zvážilo na hydrostatických vahách zavěšené na tenkém drátku nejprve na vzduchu ( $m_1$ ), následně ponořené do destilované vody ve skleněném válci při 20 °C ( $m_2$ ). Následovalo určení objemu tělesa s parafinovým obalem ( $V_1 = (m - m_2) / \rho_w$ , kde  $\rho_w = 0,998$  g·cm<sup>-3</sup>), objemu parafinového obalu ( $V_2 = (m_1 - m) / \rho_p$ , kde  $\rho_p = 0,9$  g·cm<sup>-3</sup>) a objemu tělesa bez obalu ( $V = V_1 - V_2$ ). Nakonec byla

vypočítána objemová hmotnost horniny ( $\rho = m/V$ ). Výsledná objemová hmotnost ( $\rho_d$ ) je průměrem (pro nedostatek vzorků) ze dvou až tří měření.

### 5.2.3 Pórovitost

Pórovitost horniny je dána objemem pórů k celkovému objemu vzorku horniny. Pórovitost ( $n$ ) se určí výpočtem (rovnice 7):

$$n = (1 - \rho_d / \rho_s) \cdot 100 \quad (7)$$

kde  $\rho_d$  je průměrná měrná hmotnost vzorku a  $\rho_s$  je průměrná objemová hmotnost vzorku. Výsledná pórovitost je vyjádřena v objemových procentech.

### 5.2.4 Vlhkost

Vlhkost horniny je poměr hmoty vody ke hmotě pevné fáze horniny. Voda, která se nevysuší při teplotě 105°C, se považuje za součást pevné fáze horniny (Pauli a Holoušová 1994). Pro stanovení vlhkosti se vzorek vložil do misky o známé hmotnosti ( $m_3$ ), zvážil se společně s miskou ( $m_1$ ) a vložil se do sušárny, kde se sušil s odklopeným víčkem při teplotě 70°C do ustálené hmotnosti 24 hodin. Poté se vysušený vzorek nechal vychladnout v exsikátoru a společně s miskou se opět zvážil ( $m_2$ ). Následoval výpočet hmotnosti vody ( $m_w = m_1 - m_2$ ), hmotnosti suché horniny ( $m_H = m_2 - m_3$ ) a vlhkosti horniny ( $w = m_w / m_H \cdot 100$ ). Výsledná vlhkost je vyjádřena v hmotnostních procentech s přesností na jedno desetinné místo.

### 5.2.5 Nasákavost

Nasákavost horniny je její schopnost přijímat do svých pórů vodu (Pauli a Holoušová 1994). Je stanovena jako přírůstek hmotnosti, kterou za určité teploty a tlaku a v určitém čase vzorek přijme. Pro určení nasákavosti byla nejprve určena hmotnost vysušeného vzorku ( $m_1$ ). Poté byl vzorek vložen do varné nádoby, která byla dolita destilovanou vodou 2 cm nad vzorek. Voda se vařila přibližně 3 hodiny a pak byla odstavena. Po ustálení přibližně po 48 hodinách byla určena hmotnost horniny po nasáknutí ( $m_2$ ). Pak následoval výpočet hmotnosti vody ( $m_w = m_2 - m_1$ ) a nasákavosti horniny ( $NW = (m_w / m_1) \cdot 100$ ). Výsledná nasákavost je průměrem ze dvou až tří měření a je vyjádřena v hmotnostních procentech.

## 5.3 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie

Vysokotlaká rtuťová porozimetrie byla použita ke stanovení objemů pórů, jejich povrchu, středního váženého poloměru pórů a mikropórovitosti, na základě teorie o chování nesmáčivých kapalin v kapilárním prostředí (Adamson 1967). Metoda je založena na jevu kapilární deprese rtuti, kdy úhel smáčení je větší než 90° a rtuť tak vniká do pórů teprve působením tlaku. Objem rtuti vtažené do pórového systému představuje celkový objem pórů v měřeném vzorku. Vztah mezi aktuálním tlakem  $P$  a poloměrem válcového póru  $r$  je dán Washburnovým vztahem (rovnice 8) (např. Rodriguez-Navarro a Dohne 1999).

$$P = 2\sigma \cos \varphi / r \quad (8)$$

kde  $\sigma$  je povrchové napětí rtuti a  $\varphi$  je stykový úhel.

Měření bylo provedeno na přístroji POROSIMETER 2000 Carlo Erba pracujícím v rozsahu tlaků od 0,1 do 200 MPa pro stanovení pórů v oblasti poloměrů 3,7 – 7 500 nm, tedy meso a makropóry podle klasifikace IUPAC (Marsh a Rodríguez-Reinosso 2000). Vyhodnocení bylo realizováno pomocí programu MILESTONE 200 Carlo Erba za následujících podmínek: stykový úhel 141,3°, povrchové napětí rtuti  $480 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ , válcový model pórů. Měření proběhlo v ÚSMH AVČR, Laboratoř sorpční a porometrické analýzy (Ing. Z. Weishauptová, DrSc., M. Čevelová).

#### 5.4 Rentgen difrakční analýza (XRD)

Rentgenová difrakční analýza byla použita k identifikaci hlavních minerálních fází v solných výkvětech. U metody XRD se využívá difrakce monochromatického rentgenového záření po jeho dopadu na krystalovou mřížku vzorku. Difrakce záření se dá vysvětlit jako odraz záření od soustavy rovnoběžných rovin. Jestliže se rozdíl drah paprsků odražených ze dvou různých rovin rovná celému násobku délky vlny, dojde k zesílení záření, které je pak možné detekovat (Němcová a kol. 1997). Tato podmínka se nazývá Braggův zákon, který je popsán Braggovou rovnicí (9).

$$n\lambda = 2d \sin \Theta \quad (9)$$

kde  $d$  je mezivrstevná vzdálenost (v Å),  $\Theta$  je difrakční úhel,  $\lambda$  je vlnová délka RTG záření (v Å),  $n$  je celé číslo.

Vzniklý difrakční záznam zkoumaného vzorku se porovná s difrakčními záznamy minerálů v databázi a tak se určí jeho fázové složení, neboť každá látka poskytuje svůj charakteristický difrakční obraz. Porovnáním intenzit difrakčních piků lze také využít rentgenové difrakce ke kvantitativní analýze. Pomocí metody korundových čísel (RIR) lze přibližně vypočítat zastoupení jednotlivých fází ve vzorku.

Prášková difrakční analýza probíhala na difraktometru X'Pert Pro, PANalytical B.V. (ÚGMNZ, PřF UK) za těchto podmínek: Cu anoda, napětí 40 kV, proud 30 mA, rozmezí úhlů  $^{\circ}2\theta$ : 3-80°, krok 0,05°, doba načtení 150 s. Měření provedl Mgr. Petr Drahoš, PřF UK. Naměřené XRD záznamy byly vyhodnoceny pomocí počítačového programu X'Pert HighScore 1.0d, PANalytical B.V., s využitím databáze difrakčních spekter JCPDS 1999 (vyhodnotila Lenka Melounová).

#### 5.5 Iontově výměnná chromatografie (IEC)

Iontově výměnné chromatografie bylo použito pro stanovení koncentrace vodorozpustných anionů a kationů solí ve vzorcích povrchové vrstvy horniny. Stanoveny byly aniony  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_2^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  a kationy  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ .

Podstatou metody IEC je rozdělování látek mezi 2 fáze. Iontově výměnná chromatografie probíhá na iontoměničích (Opekar a kol. 2002). Principem metody je výměna iontu iontoměniče za iont obsažený v mobilní fázi nebo ve vzorku. Iontoměničem je stacionární fáze obsahující kyselou funkční skupinu (katex, - náboj) nebo bazickou funkční skupinu (anex, + náboj). Mobilní fází je voda. Na principu soutěžení iontoměniče o tyto ionty dochází k separaci.

Měření proběhlo na přístroji Detector Shodex CD-5 s použitím pumpy Delta Chrom SDS 030 a dávkovače Autosampler AS 100. Pro stanovení aniontů byla použita kolona 150x3mm IC Anion II 10um supresor, 9mM  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , eluentem byly 1mM  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a 8mM  $\text{NaHCO}_3$ . Kationty byly stanoveny za použití kolony 125 x 4 mm Universal Cat 1-2 a eluentů 5mM kyseliny citronové a 1mM kyseliny

dipicolinové. Měření bylo provedeno ve firmě WATREX Praha, s.r.o., analýzy a vyhodnocení výsledků provedla pí. Plecítá.

## **5.6 Optické mikroskopie a mikroskopie v ultrafialovém světle**

Optická mikroskopie v procházejícím světle byla využita k charakteristice zakrytých horninových výbrusů. Sledovány byly hlavní a vedlejší minerály, jejich procentuelní zastoupení, velikost, opracovanost a vytríděnost, přítomnost akcesorií, sekundárních minerálů, tmelu apod.

Mikroskopie v ultrafialovém světle byla použita ke studiu velikosti, propojenosti a typu pórů a zjištění přítomnosti mikrotrhlin. Póry a trhliny byly zvýrazněny fluorescencí barviva obsaženého v pryskyřici, která byla vybuzena dopadajícím ultrafialovým zářením.

Mikroskopické studium bylo provedeno v optické laboratoři ÚGMNZ, PřF UK, na polarizačním mikroskopu LEICA DMPL za použití okuláru se zvětšením 10× a objektivů zvětšujících 2.5×, 5×, 10× a 20×. Fotografie byly zhotoveny digitálním fotoaparátem OLYMPUS C2000Z. Mikroskopické studium a pořízení fotografií provedla Lenka Melounová.

## **5.7 Elektronová mikroanalýza (mikrosonda)**

Metody elektronové mikroanalýzy bylo využito k doplnění mikroskopického studia, hlavně pro identifikaci akcesorických minerálů a k bližšímu určení přítomných jílových minerálů použitím bodové analýzy. Metoda elektronové mikrosondy je založena na interakci dopadajícího svazku urychlených elektronů a studovaného pevného vzorku (např. Chvátal 1999).

Elektronová mikroanalýza byla provedena na rastrovacím elektronovém mikroskopu CamScan 3200 za použití energiově disperzního mikroanalyzátoru Link ISIS, urychlovacího napětí 15 kV a Co standardu. Měření proběhlo v laboratoři rentgenové mikroanalýzy, ČGS (RNDr. Jan Malec). Během analýzy byly pořízeny fotografie ve zpětně odražených elektronech (BEI - Back Scattered Electron image).

## 6 VÝSLEDKY

### 6.1 Petrografická charakteristika horniny

Křídelní stěny tvoří mohutný odkryv svrchnokřídových křemenných pískovců. Makroskopicky se jedná o středně až hrubozrný křemenný pískovec se špatným až středně dobrým opracováním klastů, jen výjimečně se vyskytují klasty dokonale oválné. Makroskopicky lze rozeznat pouze klastický křemen.

Světle žlutavá až sytě žlutá hornina, místy obsahuje okrové polohy (oxyhydroxidy Fe). Povrch většinou kryje šedá až černá povrchová vrstva, která je často zpevněná procesem tzv. druhotného zpevnění (case hardening). Makrostavba pískovce je vrstevnatá, běžné je střídání světlejších a tmavších poloh, které jsou rovnoběžné nebo tvoří několikacentimetrové čočkovité útvary. Viditelné je střídání jemnozrnějších a hrubozrnějších vrstev, které místy na stěnách přechází až do vrstev slepenců.

Z výsledků mikroskopického studia (Příloha III) vyplývá, že hlavním horninotvorným minerálem je klastický křemen. Ve vzorcích představuje 93 až 98 obj. % klastické složky. Klasty jsou špatně zrnitostně vytríděné, angulární až subangulární, místy semioválné, zřídka se objevují i oválné. Velikost klastů se pohybuje mezi 0,05 až 2 mm, místy se vyskytují i zrna o velikosti 3 mm. Převažují monokrystalická křemenná zrna, ale častá jsou i polykrystalická (odhadem 60:40) (Obr. 11). Zdrojem křemene jsou pravděpodobně horniny magmatické i metamorfované. Část křemenných zrn, asi 1/3, zháší undulózně, časté jsou intraklastické mikrotrhliny (Obr. 14).

Draselný živec je vedlejším horninotvorným minerálem, tvoří 2 až 6 obj. % klastů. V hornině se vyskytují úlomky o velikosti nejčastěji mezi 0,1 až 0,4 mm, jen výjimečně se objevují i zrna větší. Živce jsou často popraskané, místy se v nich vyskytují intraklastické póry. Většina živců je hnědě zakalená, pravděpodobně sericitizovaná. U některých klastů je pozorovatelné dvojčatění.

Muskovit je v hornině akcesorickým minerálem, jeho množství nepřesahuje 1 obj. % klastů. Objevuje se ve formě drobných šupinek nepravidelného tvaru, místy se vyskytují i zrnka o velikosti až 0,3 mm. Dalšími akcesoriemi je turmalín a sloupečkovitý biotit (Obr. 16). Metodou elektronové mikrosondy byla v horninách prokázána přítomnost rutilu a zirkonu.

Sekundární minerály jsou zastoupeny oxyhydroxidy Fe, které tvoří povlaky na zrnech, místy vyplňují prostory mezi zrny a jsou součástí tmelu. V malém množství se také na povrchu zrn vyskytují jílové minerály, které místy vyplňují i pórový prostor. Metodou elektronové mikrosondy bylo prokázáno, že se jedná o kaolinit.

V hornině nebyly objeveny žádné úlomky hornin ani bioklasty. V pórovém prostoru, hlavně v nejsvrchnější povrchové vrstvě, je jemně rozptýlená černá organická hmota.

Cementační materiál (tmel) je převážně obalový, místy i dotykový. Je tvořen oxyhydroxidy Fe (Obr. 15), místy jílovými minerály - kaolinitem (identifikovaný metodou elektronové mikrosondy) (Obr. 16, 18) a v některých vzorcích je na povrchu horniny (horninová krusta) patrný tmel křemitý (druhotná silicifikace) (Obr. 17).

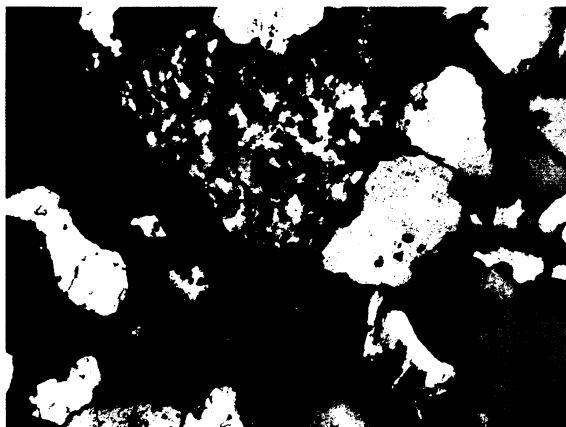
Mikrostavba je většinou masivní, v některých výbrusech je pozorovatelná vrstevnatá mikrostavba, tvořená střídáním jemnozrnější a hrubozrnější polohy.

Pórový prostor je velmi hojný (Obr. 12). Póry jsou převážně interklastické a mají nepravidelný průřez. Jsou propojené nebo částečně propojené, časté jsou i póry izolované, zvláště mezi menšími klasty. Místy dosahují velikosti až 0,5 mm. Směrem k povrchu se objem pórů viditelně zvětšuje, v povrchové tmavé vrstvě (skalní kůra) je objem pórů menší, neboť jsou vyplněny tmelem, organickou hmotou a



prachem (Obr. 19, 20). Výjimečně se objevují i póry intraklastické (v K-živcích).

Mikrotrhliny jsou hlavně uvnitř křemenných klastů (Obr. 14), jsou všesměrné a objevují se častěji směrem k povrchové vrstvě. Časté jsou i průběžné exfoliační trhliny rovnoběžné s povrchovou vrstvou (Obr. 13).



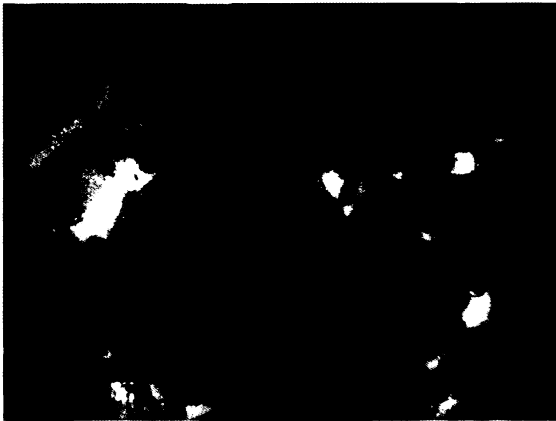
Obr. 11. Charakteristická mikrostavba studovaných hornin – převaha monokrystalických klastů křemene, místy též polykrystalický křemen. Vzorek KS/V/2, X nikoly, zvětšeno 100× (foto L. Melounová).



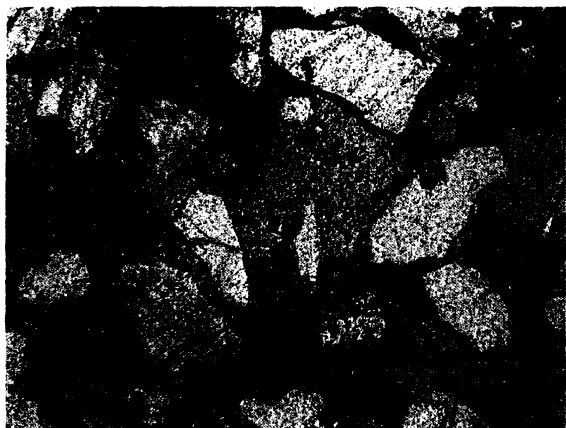
Obr. 12. Zvýrazněním pórového prostoru fluorescencí v ultrafialovém záření je dobře viditelný hojný pórový prostor a propojenost pórů u vzorku KS/VI/5. Patrná je také středně dobrá zrnitostní vytříděnost a stupeň opracování klastů. Zvětšeno 25× (foto L. Melounová).



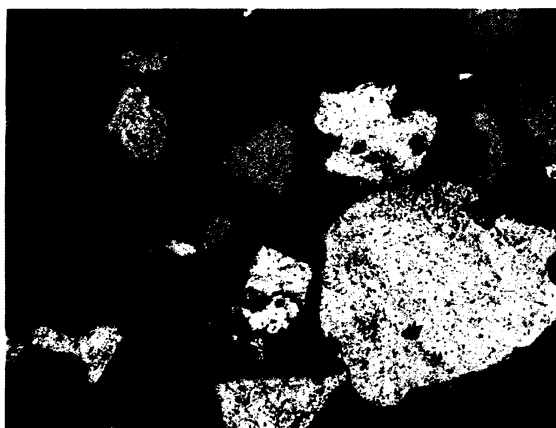
Obr. 13. Exfoliační trhliny v povrchové vrstvě horniny (spodní strana snímku) vzorku KS/IV/3 viditelné v ultrafialovém světle. Pórový prostor povrchové vrstvy je místy vyplněn druhotnou silicifikací a oxyhydroxidy Fe. Zvětšeno 100× (foto L. Melounová).



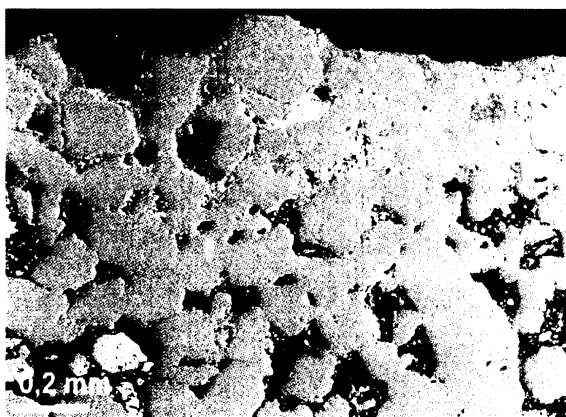
Obr. 14. Všesměrné intraklastické mikrotrhliny v křemenných klastech zvýrazněné fluorescencí v ultrafialovém světle u vzorku KS/VI/1. Mezi klasty jsou viditelné poměrně velké izolované nebo částečně propojené interklastické póry. Zvětšeno 100× (foto L. Melounová).



Obr. 15. Oxyhydroxidy Fe, které vyplňují pórový prostor mezi klasty křemene vzorku KS/IV/2, Il nikoly, zvětšeno 100× (foto L. Melounová).



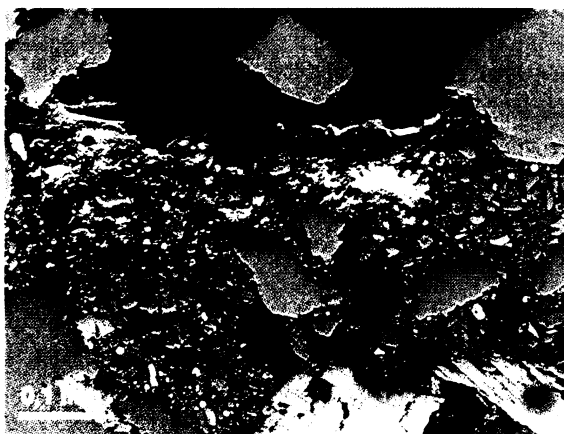
Obr. 16. Sloupečkovitý klast biotitu (potvrzeno mikrosondou) mezi klasty křemene u vzorku KS/IV/2. Na velkém křemenném klastu (vpravo dole) je patrný tenký povlak jílových minerálů. X nikoly, zvětšeno 100× (foto L. Melounová).



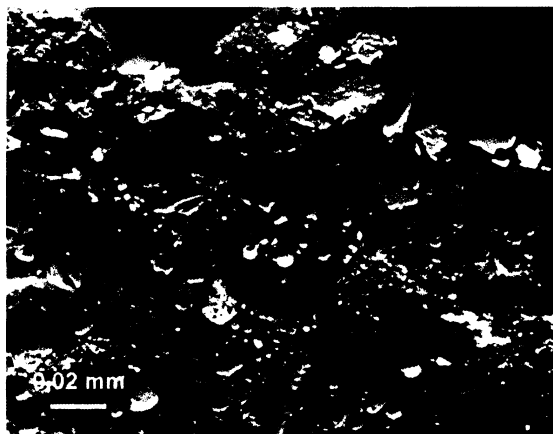
Obr. 17. Fotografie povrchové vrstvy vzorku KS/IV/2 ve zpětně odražených elektronech. Pórový prostor těsně u povrchu horniny (horní strana snímku) je zcela vyplněn druhotnou silicifikací s příměsí oxyhydroxidů Fe. Směrem do hloubky je pórový prostor hojnější (foto RNDr. Jan Malec).



Obr. 18. Krystalky kaolinitické základní hmoty mezi klasty křemene (tmavší klasty) a žívcem (světlejší klast) viditelné ve zpětně odražených elektronech u vzorku KS/IV/2 (foto RNDr. Jan Malec).



Obr. 19. Póry v povrchové vrstvě vzorku KS/I/4 nejsou zpevněné tmelem, jsou otevřené a vyplněné organickou hmotou a prachovými částicemi. (foto RNDr. Jan Malec).



Obr. 20. Detail výplně povrchových pórů vzorku KS/I/4. Metodou elektronové mikrosondy bylo určeno, že jde hlavně o organickou hmotu a křemitý prach s příměsí popílků pocházejících pravděpodobně ze spalování v blízkých tepelných elektrárnách (kulovité částice obsahující velké množství Al a Si s příměsí K a Fe). Světlé krystalky na povrchu horniny (horní strana snímku) byly identifikovány jako sírany obsahující Al. (foto a interpretace RNDr. Jan Malec).

Na základě makroskopického a mikroskopického studia lze horninu charakterizovat jako střednězrný až hrubozrný křemenný pískovec s pórovou stavbou (Dudek a kol. 1962).

## 6.2 Fyzikální vlastnosti hornin

Z laboratorního stanovení fyzikálních vlastností (Tab. 4) vyplývá, že vlhkost hornin se pohybovala mezi 3 až 14 hm. %, nasákavost nejčastěji mezi 8 a 14 hm. %. Výjimku tvoří vzorky KS/VI/1, KS/V/1 a hlavně KS/IV/4-1, kde byla nasákavost nižší než 7 hm. %. Celková pórovitost, vypočítaná z měrné a objemové hmotnosti hornin, se pohybuje mezi 25,6 a 43,9 obj. %, nejčastěji mezi 30 – 35 obj. %. Výjimku tvoří vzorek KS/IV/2 s celkovou pórovitostí pouze 16,3 obj. %.

Tab. 4. Výsledky stanovení fyzikálních vlastností hornin.

vzorek	vlhkost w (hm. %)	nasákavost NV (hm. %)	objemová hmotnost $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	měrná hmotnost $\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	celková pórovitost (obj.%)
KS/I/1	4,7	14,0	1,651	2,945	43,9
KS/I/2	3,3	12,2	1,796	2,955	39,2
KS/I/3	3,6	10,1	1,791	2,835	36,8
KS/I/4	3,6	10,2	1,871	2,836	34,0
KS/I/5	5,7	12,9	2,127	2,86	25,6
KS/IV/1	5,3	9,6	1,811	2,898	37,5
KS/IV/2	4,3	10,4	2,297	2,745	16,3
KS/IV/2-1	4,7	11,7	1,972	2,879	31,5
KS/IV/3	10,5	10,7	1,849	2,745	32,6
KS/IV/4-1	6,8	2,4	2,119	2,9	26,9
KS/IV/4-2	4,0	14,6	2,047	2,791	26,7
KS/IV/5	8,0	11,0	1,826	3,072	40,6
KS/V/1	5,7	6,3	1,862	2,961	37,1
KS/V/2	14,1	8,5	1,928	2,783	29,1
KS/V/3	7,6	9,0	1,983	2,889	31,4
KS/V/4	2,8	10,2	2,137	2,998	28,7
KS/VI/1	4,8	4,3	1,954	2,923	33,2
KS/VI/2	9,4	9,5	1,886	3,093	39,0
KS/VI/3	8,5	9,3	1,987	3,035	34,5
KS/VI/4	4,5	7,8	1,937	2,84	31,8
KS/VI/5	7,0	8,7	1,853	2,809	34,0
KS/VII/1	13,1	9,3	1,846	2,949	37,4

## 6.3 Mikropórovitost stanovená vysokotlakou rtuťovou porozimetrií

Z výsledků stanovení mikropórovitosti metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie (Tab. 5) vyplývá, že propojené póry o velikosti mezi 3,7 a 7 500 nm tvoří 2,8 až 9 % celkového objemu horniny. To odpovídá přibližně 10 až 15 % z celkové pórovitosti. Výjimkou jsou vzorky KS/4/3 a KS/VI/5, kde mikropórovitost přesáhla 20 % pórovitosti, a vzorek KS/4/2, kde tyto póry tvoří až 36 % celkové pórovitosti.

Metodou vysokotlaké Hg porozimetrie byla také zjišťována distribuce pórů v pískovci. Z grafů velikostního rozložení pórů (Příloha IV) je patrné, že největší objem ve všech vzorcích zabírají kapilární póry o velikosti 100 – 500 nm. Zřejmý je u některých vzorků (KS/IV/3, KS/IV/5) i nárůst pórů mezi 3500 – 4000 nm.

Tab. 5. Výsledky měření vysokotlakou Hg porozimetrií, kde ( $V_{mm}$ ) je objem pórů, ( $S_{mm}$ ) je povrch pórů, ( $r$ ) je střední vážený poloměr pórů, mikropórovitost je procentální zastoupení propojených kapilárních pórů o velikosti mezi 3,7 a 7 500 nm v celkovém objemu horniny. Poslední sloupec tabulky uvádí procentuální zastoupení pórů stanovených Hg porozimetrií z celkové pórovitosti horniny, výsledná hodnota je průměrem ze 2 měření.

vzorek	výška odběru (m)	$V_{mm}$ (mm <sup>3</sup> /g)	$S_{mm}$ (mm <sup>2</sup> /g)	$r$ (nm)	mikropórovitost (obj. %)	mikropórovitost z celk. pórovitosti (%)
<b>severní stěna</b>						
KS/I/1	0,5 m	18,77	0,75	224	4,93	11,8
		20,38	0,59	3538	5,4	
KS/I/2	1 m	19,02	0,58	224	4,84	12,5
		19,06	1,11	236	4,93	
KS/I/3	1,5 m	12,45	0,64	205	3,19	9,4
		14,78	1,28	13	3,76	
KS/I/4	2 m	11,48	0,6	1191	2,98	9,6
		13,44	0,96	310	3,54	
<b>jižní stěna</b>						
KS/IV/2	0,7 m	20,53	0,49	265	5,29	35,7
		24,21	0,84	254	6,34	
KS/IV/3	1,1 m	23,71	0,36	3503	6,04	20,3
		28,27	1,44	2906	7,17	
KS/IV/5	1,9 m	11,7	0,8	293	3,08	9,1
		11,15	0,48	3503	2,86	
<b>východní stěna</b>						
KS/V/1	0,5 m	15,15	1,11	249	3,92	10,7
		15,61	0,8	249	4,04	
KS/V/2	1 m	12,23	0,21	214	3,21	12
		14,45	0,71	236	3,77	
KS/V/3	1,5 m	18,64	1,31	236	4,93	16,8
		19,24	1,46	236	5,61	
<b>západní stěna</b>						
KS/VI/1	0,5 m	16,85	1,18	264	4,43	13,6
		17,68	0,95	224	4,63	
KS/VI/2	1 m	13,08	0,78	214	3,46	9
		13,52	0,97	14	3,59	
KS/VI/3	1,5 m	15,04	0,85	236	3,86	11
		14,12	0,7	236	3,7	
KS/VI/5	2,5 m	33,39	1,93	2523	8,98	25,4
		30,47	1,44	205	8,28	

## 6.4 Fázové a chemické složení přítomných solí:

### 6.4.1 Fázové složení solných výkvětů

Studované solné krusty jsou tvořeny převážně sírany, prokázána byla i přítomnost chloridů a dusičnanů. Metodou práškové rentgenové difrakce solných výkvětů byly v 31 vzorcích identifikovány následující minerální fáze: sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), který byl přítomen ve všech vzorcích,  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (30 vzorků), čermíkit ( $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) (3 vzorky), alunit ( $\text{K}(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ ) (4 vzorky), alunogen ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ ) (2 vzorky), hydrofilit ( $\text{CaCl}_2$ ) (7 vzorků) a nitramit ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) (9 vzorků). V jednom vzorku byl identifikován anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ). Součástí solných krust je také makroskopicky viditelný klastický křemen ( $\text{SiO}_2$ ) (29 vzorků). Fázové složení jednotlivých vzorků je uvedeno v Tabulce 6, grafické znázornění naměřených spekter je zobrazeno v Příloze V.

Tab. 6. Fázové složení solných výkvětů určené metodou práškové rentgenové difrakce:

vzorek	Al - sírany	sádrovec anhydrit	křemen	chloridy	dusičnany
<b>severní stěna</b>					
KS/II/1a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/II/2a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/II/3a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$			
KS/II/4a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	
<b>jižní stěna</b>					
KS/III/1	$(NH_4)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ - čermíkit	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/IV/1a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		$NH_4NO_3$
KS/IV/2a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		$NH_4NO_3$
KS/IV/3a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $NaAl(SO_4)_2 \cdot (H_2O)_{12}$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/IV/4a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/IV/5a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $(NH_4)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ - čermíkit	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/IV/6a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $(NH_4)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ - čermíkit	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
<b>východní stěna</b>					
KS/V/1a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	
KS/V/2a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		$NH_4NO_3$
KS/V/3a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$			$NH_4NO_3$
KS/V/4a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $K(Al_3(SO_4)_2(OH)_6)$ - alunit $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$ - alunogen	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/V/5a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/V/6a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		$NH_4NO_3$
KS/V/7a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/V/8a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	$NH_4NO_3$
KS/V/9a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $K(Al_3(SO_4)_2(OH)_6)$ - alunit	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ $CaSO_4$	$SiO_2$		
<b>západní stěna</b>					
KS/VI/1a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	$NH_4NO_3$
KS/VI/2a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $K(Al_3(SO_4)_2(OH)_6)$ - alunit	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$			
KS/VI/3a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	
KS/VI/4a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		$NH_4NO_3$
KS/VI/5a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/VII/1a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	$NH_4NO_3$
KS/VII/2a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$ - alunogen	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/VII/3a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/VII/4a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $K(Al_3(SO_4)_2(OH)_6)$ - alunit	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$	$CaCl_2$	
KS/VII/5a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		
KS/VII/6a	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$SiO_2$		

#### 6.4.2 Chemismus vodorozpustných solí přítomných v hornině

Metodou iontově výměnné kapalinové chromatografie byly stanoveny obsahy vybraných iontů v povrchové vrstvě horniny. Z výsledků měření (Tab. 7) vyplývá převaha síranů ve všech vzorcích, téměř ve všech byly zastoupeny také dusičnany (mimo vzorku KS/I/5). Asi polovina vzorků obsahovala v malém množství chloridy do 0,02 hm.%, výjimečně byly přítomny fosforečnany do 0,02 hm. %. Přítomnost fluoridů a dusičnanů nebyla potvrzena. Z kationtů byly ve většině vzorků potvrzeny  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ , jejichž obsahy se pohybují od 0,01 do 0,1 hm.%. V menším množství je obsažen do 0,05 hm. % i kationt  $NH_4^+$ .

Tab. 7. Koncentrace aniontů a kationtů vodorozpustných solí v hornině určená metodou IEC z horninového vodného výluhu, hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních % (- = pod mezí detekce).

vzorek	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
<b>severní stěna</b>											
KS/I/1	0,01	-	-	0,03	-	0,33	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
KS/I/2	0,01	-	-	0,04	-	0,62	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01
KS/I/3	0,01	-	-	0,02	0,01	0,60	-	0,05	0,01	0,01	0,01
KS/I/4	-	-	-	0,01	-	0,49	0,03	0,05	-	0,01	0,02
KS/I/5	-	-	-	-	-	0,06	0,02	-	-	-	-
<b>jižní stěna</b>											
KS/III/1	0,01	-	-	0,03	-	0,88	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03
KS/IV/1	0,02	-	-	0,03	-	0,37	0,01	0,01	0,06	0,08	-
KS/IV/2	0,01	-	-	0,11	0,02	0,44	0,03	0,02	0,04	0,05	0,01
KS/IV/2-1	-	-	-	0,09	-	0,42	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02
KS/IV/2-2	0,01	-	-	0,10	-	0,24	-	0,01	0,05	0,03	-
KS/IV/2-3	0,01	-	-	0,18	-	0,26	-	0,01	0,05	0,05	-
KS/IV/2-4	-	-	-	0,06	-	0,11	-	0,01	0,03	0,02	-
KS/IV/3	0,01	-	-	0,20	0,01	0,63	0,01	0,07	0,06	0,06	0,02
KS/IV/4-1	0,01	-	-	0,13	-	0,54	-	0,03	0,06	0,05	0,02
KS/IV/4-2	0,01	-	-	0,11	-	0,61	-	0,07	0,03	0,03	0,02
KS/IV/5	0,01	-	-	0,12	-	0,80	-	0,1	0,04	0,04	0,04
<b>východní stěna</b>											
KS/V/1	-	-	-	0,05	0,01	0,87	0,03	0,06	0,01	0,01	0,04
KS/V/2	-	-	-	0,03	-	0,31	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
KS/V/3	-	-	-	0,01	-	0,15	-	-	-	0,01	-
KS/V/4	-	-	-	0,02	-	0,8	0,05	0,07	-	0,01	0,05
<b>západní stěna</b>											
KS/VI/1	-	-	-	0,01	0,01	0,75	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03
KS/VI/2	-	-	-	0,02	-	0,60	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02
KS/VI/3	-	-	-	0,05	-	1,05	0,05	0,08	0,01	0,02	0,04
KS/VI/4	-	-	-	0,01	-	0,49	0,07	0,02	-	0,01	0,01
KS/VI/5	0,01	-	-	0,09	-	0,51	0,05	0,03	-	0,01	0,01
KS/VII/1	0,01	-	-	0,06	-	0,14	-	-	0,01	0,01	-

## 7 DISKUZE

### 7.1 Chemické a fázové složení solných krust a výkvětů

Metodou práškové rentgenové difrakce solných krust a výkvětů byly orientačně stanoveny přítomné hlavní minerální fáze. Přítomnost fází s obsahem pod cca 3 hm. % nelze touto metodou určit. Zastoupení minoritních složek bylo proto odvozeno z chemismu výluhů vodorozpustných solí, stanoveného iontově výměnnou chromatografií.

V oblasti Křídelní stěny v NP České Švýcarsko je většina solných krust tvořena sírany, zejména sádrovcem (popř. anhydritem), komplexními K/NH<sub>4</sub>-Al sírany, (KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O, čermíkitem (NH<sub>4</sub>Al(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O) a alunitem (Al<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>). Identifikován byl také alunogen Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·17H<sub>2</sub>O a v 1 případě NaAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>12</sub>. Převaha síranů nad ostatními anionty vyplývá z výsledků IEC i XRD.

Jak ukazují předchozí práce, je síra novotvořených síranů solných krust české křídlové pánve nejčastěji atmosférického původu (Buzek a Šrámek 1985, Buzek a kol. 1991, Novák a kol. 2001, Soukupová a kol. 2002b, Příkryl a kol. 2004, Holeček 2004) a neprokazují se dříve prosazované názory o původu síry výhradně ze zvětrávajících sulfidů (Novák 1914). Oblast severních a severozápadních Čech byla dlouhodobě ovlivňována emisemi SO<sub>2</sub> ze spalování fosilních paliv tepelných elektráren ČR, Polska a SRN. Proto lze předpokládat, že atmosférické znečištění je nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím složení solných krust této oblasti.

Sádrovec solných krust vzniká většinou sulfatací, což je reakce SO<sub>2</sub> s CaCO<sub>3</sub> obsaženým v hornině (popř. stavebních materiálech) za přítomnosti vody. Horniny, vyskytující se v této oblasti, jsou křemenné pískovce, které podle mikroskopického studia neobsahují karbonát v klastické podobě ani v základní hmotě. Nízké nebo nulové koncentrace Ca<sup>2+</sup> iontů v hornině potvrzují i výsledky IEC. Přesto je zde sádrovec nejběžnějším minerálem v solných krustách. Na jeho tvorbě má pravděpodobně také vliv chemické složení srážek, neboť kromě SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> jsou typickou složkou kyselých srážek i Ca<sup>2+</sup> ionty (Stumm a Morgan 1981). Zdrojem Ca<sup>2+</sup>, který kromě sádrovce tvoří fázi CaCl<sub>2</sub> (identifikován v solných krustách metodou XRD), může být také podzemní voda (Winkler 1994).

Studovaná oblast je charakteristická výskytem Al-síranů. Hliník se uvolňuje z půdy a alumosilikátů obsažených v hornině vlivem kyselosti atmosférické depozice (Cílek 1998). Oblast NP České Švýcarsko byla dlouhodobě vystavena vysoké zátěži kyselé atmosférické depozice. Během posledních let (2002 až 2005) dosahovaly srážky v této oblasti průměrných hodnot pH mezi 4,4 až 4,8, výjimečně byly naměřeny na území NP i hodnoty pH 3,9 – 4 (údaje naměřené v NP ČŠ, laskavě poskytnuté Mgr. Z. Vařilovou). Snížené pH ovlivňuje chemické složení solí přítomných v solných krustách.

Cílek (1998) popisuje sukcesi vznikajících solí vyluhováním a neutralizací kyselých srážek. Nejprve dochází k neutralizaci karbonátů v karbonátem bohatých horninách za vzniku sádrovce. V druhém stádiu dochází k vyluhování K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> a Ca<sup>2+</sup> vázaných na jílové minerály za vzniku komplexních síranů. Nakonec dojde k rozpadu živců a jílových minerálů za vzniku Si(OH)<sub>4</sub> a Al(OH)<sub>3</sub> komplexů. Charakteristickým reakčním produktem třetího stádia je například alunogen, identifikovaný metodou XRD ve 2 vzorcích okolí Křídelní stěny, který už neobsahuje žádné alkálie. Jeho častější výskyt v současnosti může být způsoben vyčerpáváním neutralizační schopnosti půd a substrátů, ale také menším vymýváním solí díky suššímu a teplejšímu počasí (Cílek 1998). Podle experimentů, které provedli Williams a Robinson (1998) jsou K/NH<sub>4</sub>-Al sírany vysoce destruktivními solemi, jejichž zvětrávací činnost bývá umocněna přítomností sádrovce. Alunogen má nižší zvětrávací účinky než komplexní Al-sírany.

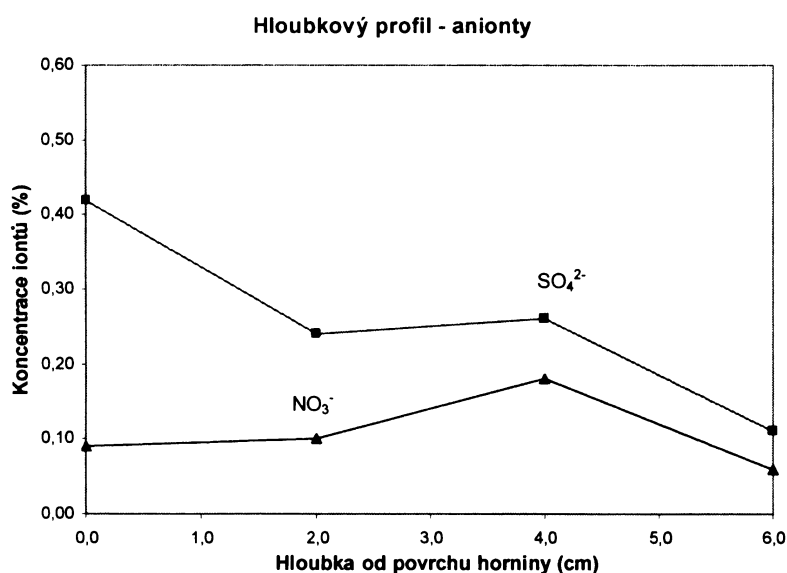
Nejčastějším komplexním Al-síranem ve studované oblasti je KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O. K uvolňování draslíku dochází pravděpodobně také vyluhováním vlivem sníženého pH z jílových minerálů a živců.



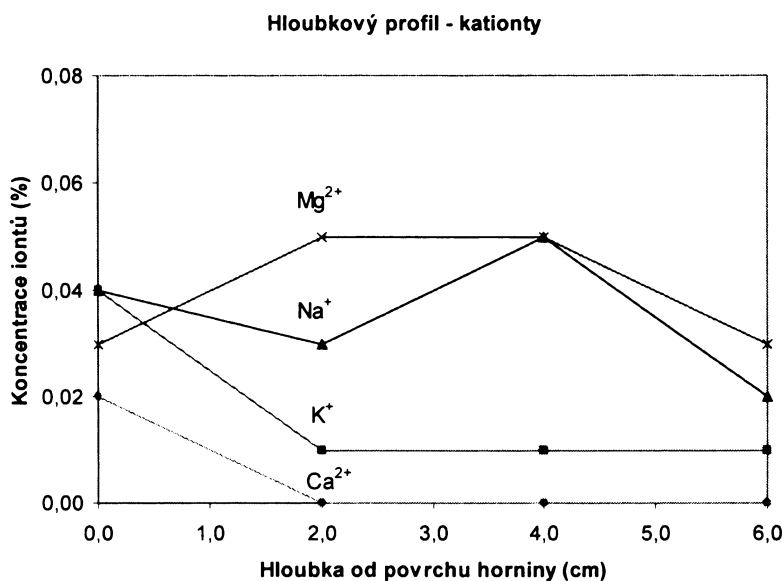
Draslík je nejběžnější příměsí v  $\text{NH}_4^+$  -  $\text{Al}^{3+}$  strukturách (Soukupová a kol. 2002a podle Hostomského a kol. 1998) a jeho mobilita se zvyšuje se snižujícím se molárním poměrem  $\text{NH}_4^+/\text{Al}^{3+}$  v roztoku.

Kromě síranů byly v povrchových vrstvách horniny stanoveny metodou IEC i obsahy chloridů a dusičnanů. Rentgenovou difrakční analýzou solných krust byly tyto sole identifikovány jako hydrofilit -  $\text{CaCl}_2$  a nitramit -  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Dusičnany, chloridy i amonný kationt jsou také typickými složkami kyselé srážkové vody (Stumm a Morgan 1981). Dusičnany nebo  $\text{NH}_4^+$  mohou také pocházet z půdy a biologické činnosti organismů. Vzhledem k tomu, že studovaná oblast je v 1. zóně NP v úrovni lesa, dá se vyloučit jako zdroj  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{PO}_4^{3-}$  používání umělých hnojiv.

Z výsledků IEC byla také u jednoho vzorku (KS/IV/2-1 až KS/IV/2-4) stanovena hloubková distribuce vybraných kationtů a aniontů. Změny koncentrace solí od povrchu horniny do hloubky 6 cm jsou znázorněny graficky na obrázcích (21) a (22). Z grafů je patrné nabohacení  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{Ca}^{2+}$ , tedy sádrovce, u povrchu horniny. Podobný průběh má i  $\text{K}^+$ , který také dosahuje maximálních koncentrací v povrchové vrstvě, kde je součástí vykrystalizovaných K-Al síranů. Sobě podobný průběh mají  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{Na}^+$  ionty. Jejich koncentrace je maximální v hloubce kolem 4 cm pod povrchem, na povrchu jsou pravděpodobně vyplaveny. Z podobného průběhu lze usuzovat, že by spolu tyto dva ionty mohly tvořit minoritní minerální fázi, nitratin ( $\text{NaNO}_3$ ), která nebyla identifikována metodou XRD.



Obr. 21. Hloubkové změny koncentrace aniontů vzorku KS/IV/2-1 až KS/IV/2-4.



Obr. 22. Hĺoubkové změny koncentrace kationtů vzorku KS/IV/2-1 až KS/IV/2-4.

## 7.2 Výskyt solných krust a výkvětů v závislosti na geografických parametrech

Ve studované lokalitě Křídelní stěny se soli vyskytují na horninovém povrchu ve formě různě mocné solné krusty nebo jako jemné práškovité solné výkvěty. Vyskytují se na povrchu obnažené horniny i na zpevněné skalní kůře, na svislých i převislých stěnách, uvnitř dutin i voštín. Z výsledků XRD analýzy je patrné, že výskyt solných krust je do určité míry ovlivněn geografickými parametry v závislosti na rozpustnosti solí. Sádrovec, který se vyznačuje poměrně nízkou rozpustností (Goudie a Viles 1997) je přítomen ve všech studovaných vzorcích. Oproti tomu rozpustný  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  byl identifikován zejména ve vzorcích, které byly odebrány hlavně z míst chráněných vůči vymývání, jako jsou vnitřní stěny dutin a voštín a převislé stěny.

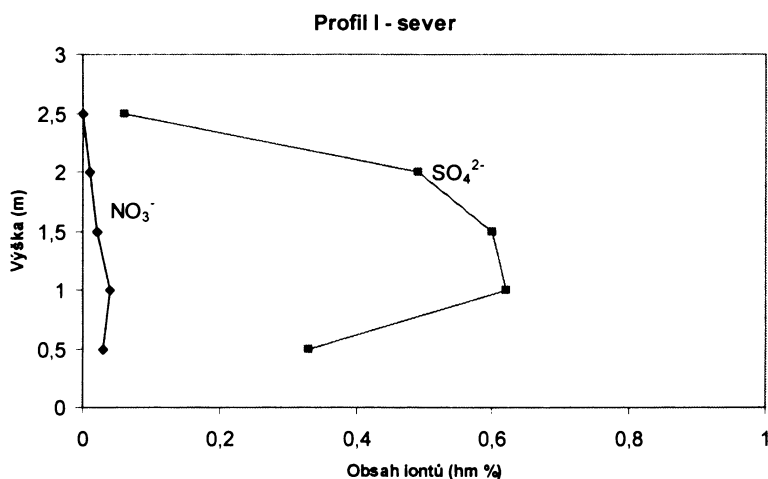
Zajímavý je také vliv expozice vůči světové straně. Na severní stěně nebyly v detekovaném množství zjištěny v solných krustách téměř žádné chloridy ani dusičnany, které mají vyšší rozpustnost než většina síranů (Winkler 1994, Goudie a Viles 1997). Potvrzen nebyl ani výskyt jiných Al-síranů než  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Tento jev lze vysvětlit zvýšeným vymýváním rozpustných solí na exponované severní stěně a nedostatečným slunečním vysušováním stěny.

Oproti tomu jižní stěna je jediná, kde byl identifikován rozpustnější (Breiter 1976) čermíkit. Metodou IEC zde byly potvrzeny vyšší koncentrace dusičnanů a častý výskyt chloridů v povrchové vrstvě horniny oproti ostatním stěnám.

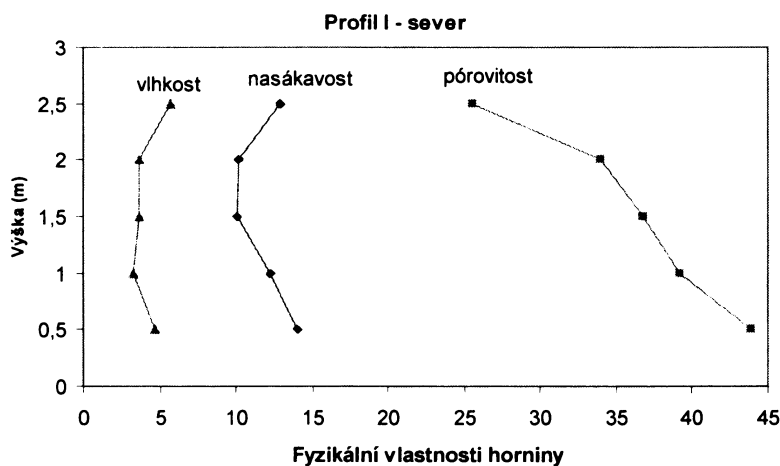
Východní a západní stěna mají podobné složení solných krust. To může být způsobeno například zvýšeným vymýváním rozpustnějších solí na západní stěně, která je ale zároveň vystavena delšímu a intenzivnějšímu slunečnímu svitu, což může podpořit zpětnou krystalizaci solí. Významný vliv na výskyt krust a výkvětů mají bezpochyby také krátkodobé změny počasí.

### 7.3 Distribuce solí v hornině

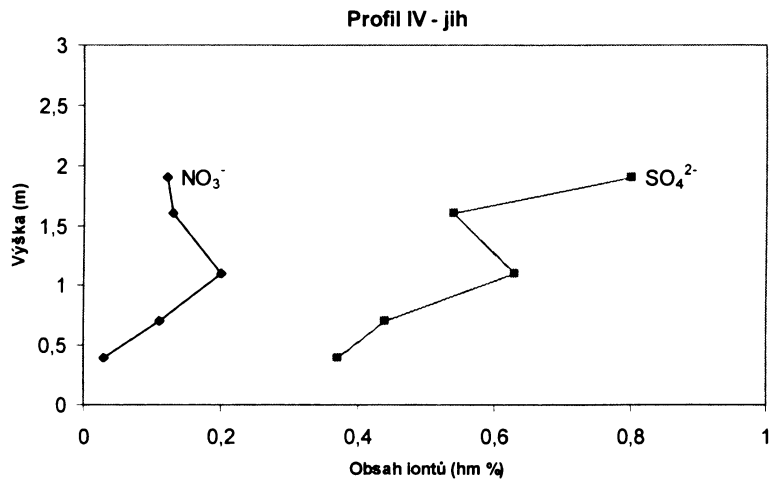
Z výsledků IEC byla stanovena distribuce solí ( $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$ ) ve vertikálním profilu spodní části stěn od úpatí do výšky 2-2,5 m. Obsahy solí byly stanoveny ve vrchní vrstvě horniny o mocnosti cca 2-3 cm. Rozložení solí ve stěnách exponovaných ke všem čtyřem světovým stranám ukazují grafy na Obr. 23, 25, 27 a 29. Pro porovnání jsou uvedeny i grafy vertikálních změn vlhkosti, nasákavosti a pórovitosti horniny u stejných vzorků (Obr. 24, 26, 28 a 30).



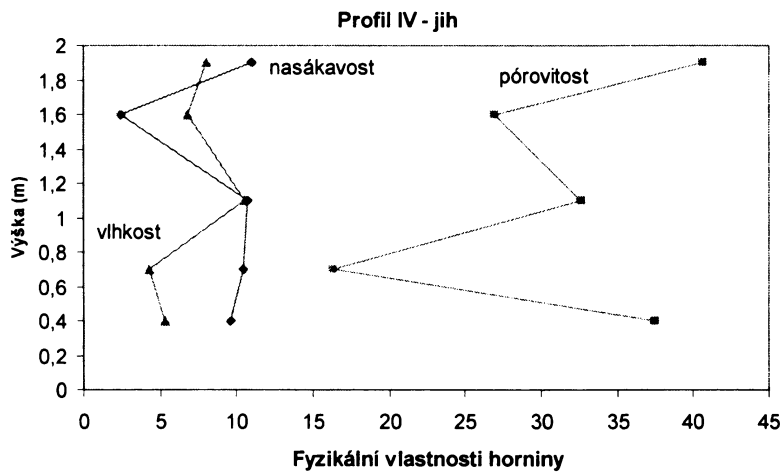
Obr. 23. Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  v severním defilé Křidelních stěn (profil I).



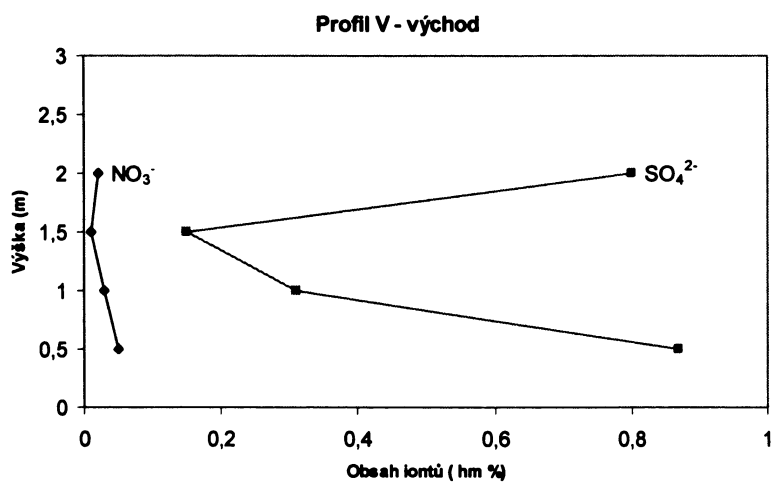
Obr. 24. Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny v severním defilé Křidelních stěn (profil I). Hodnoty vlhkosti a nasákavosti jsou uvedeny v hm. %, pórovitosti v obj. %.



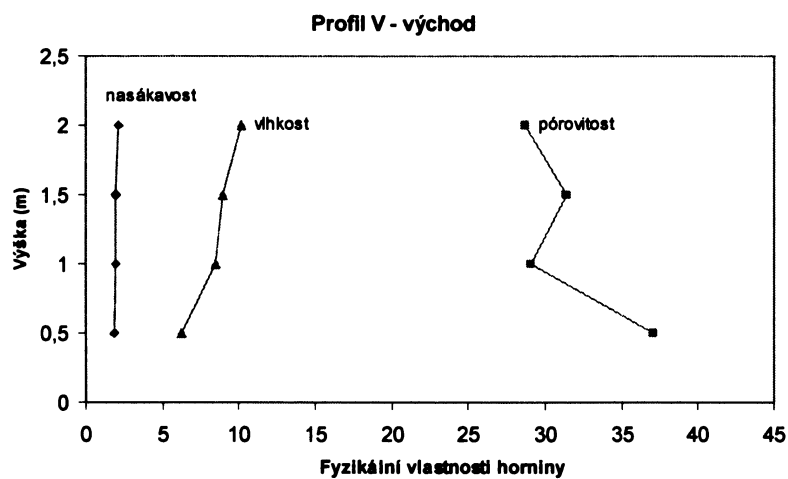
Obr. 25. Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  v jižním defilé Křídelných stěn (profil IV).



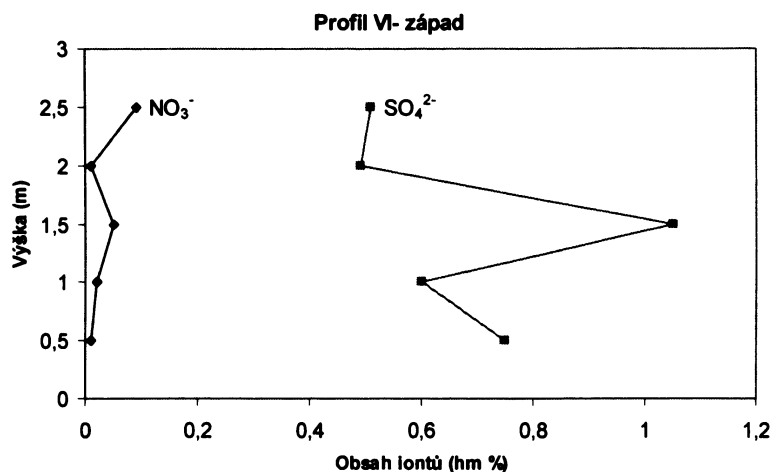
Obr. 26. Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny v jižním defilé Křídelných stěn (profil IV). Hodnoty vlhkosti a nasákavosti jsou uvedeny v hm. %, pórovitosti v obj. %.



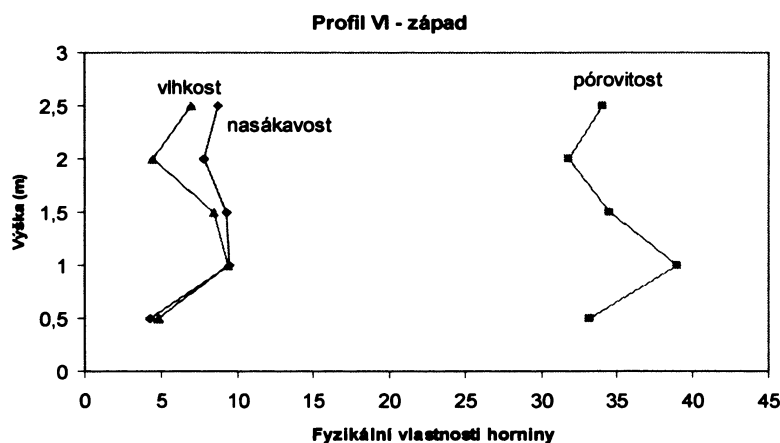
Obr. 27. Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  ve východním defilé Křídelních stěn (profil V).



Obr. 28. Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny ve východním defilé Křídelních stěn (profil V). Hodnoty vlhkosti a nasákavosti jsou uvedeny v hm. %, pórovitosti v obj. %.



Obr. 29. Vertikální distribuce  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$  v západním defilé Křídelních stěn (profil VI).



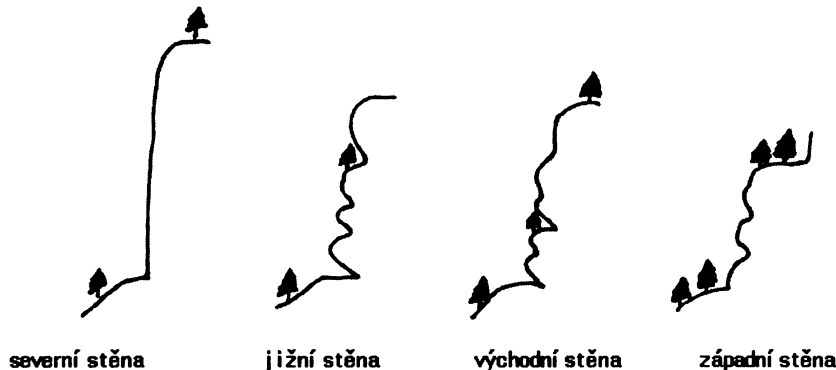
Obr. 30. Vertikální změny fyzikálních vlastností horniny v západním defilé Křídelních stěn (profil VI). Hodnoty vlhkosti a nasákavosti jsou uvedeny v hm. %, pórovitosti v obj. %.

Rozložení solí v Křídelních stěnách přesně neodpovídá modelu navrženému Arnoldem a Zehnderem (1990) pro distribuci solí ve zdivu v důsledku vztlínající vlhkosti (srovnej Obr. 2). Podle tohoto modelu, platného pro exteriér budov, krystalizuje většina solí ve výšce mezi 0,5 a 1 m a zde také dochází k největšímu zvětrávání hornin. Naproti tomu v interiérech se zóna maximálního poškození může posouvat do větších výšek kvůli vícezdrojovému původu solí (Přikryl 2005).

Ve vertikálních profilech pískovcových stěn studované oblasti se objevují dvě úrovně s maximálními hodnotami koncentrace solí. U jižní stěny je to ve výšce 1 m a následně 2 m, ve východní stěně ve výšce 0,5 a 2 m. Maximum v nižší poloze je pravděpodobně způsobeno nahromaděním solí vlivem vztlínající vlhkosti. Zvýšená koncentrace ve výšce 2 metrů se dá vysvětlit nahromaděním solí přinesených vlhkostí prosakující z vyšších partií stěny. Bohužel z míst ležících nad 2 m (popř. 2,5 m) nebyly vzorky pro nepřístupnost odebrány, proto nelze koncentrace ve výšce 2 m s jistotou určit jako maximální. U západní stěny se nejvyšší koncentrace solí objevuje ve výšce 1,5 m. Z grafu (Obr. 29) je však patrný další nárůst od výšky 2,5 m, který je pravděpodobně způsoben také vlivem přínosu solí obsažených ve vlhkosti prosakující z vyšších partií.

Vícezdrojovému modelu původu solí (Přikryl 2005), kdy se uplatňuje kromě vztlínání i průsak vlhkosti z výše položených částí stěny, nasvědčuje i celkový vzhled horninového povrchu stěn (Obr. 31). Obě

stěny (jižní i východní) jsou velmi členité, jsou rozčleněny římsami a převisy na jednotlivá patra, místy se vyskytuje slabý půdní pokryv a vegetace. To umožňuje snadné zachycení a následné prosakování dešťové vody do nižších poloh. Západní stěna je také členitá a dosahuje výšky jen do 8 m. Nad ní se nachází další skalní patra a bohatá vegetace.



Obr. 31: Přibližný náčrt celkového povrchu studovaných skalních stěn.

Oproti tomu severní stěna je rovná a kolmá, dosahuje výšky kolem 15 m bez výrazného rozčlenění. Tato situace pravděpodobně neumožňuje průsak vlhkosti z nejvyšších partií až do výšky odběru vzorků a nedochází zde k mísení zdrojů solí. Tomu odpovídá i vertikální distribuce solí, kdy maximální koncentrace síranů i dusičnanů jsou v 1 m nad úroveň terénu a poté velmi výrazně klesají.

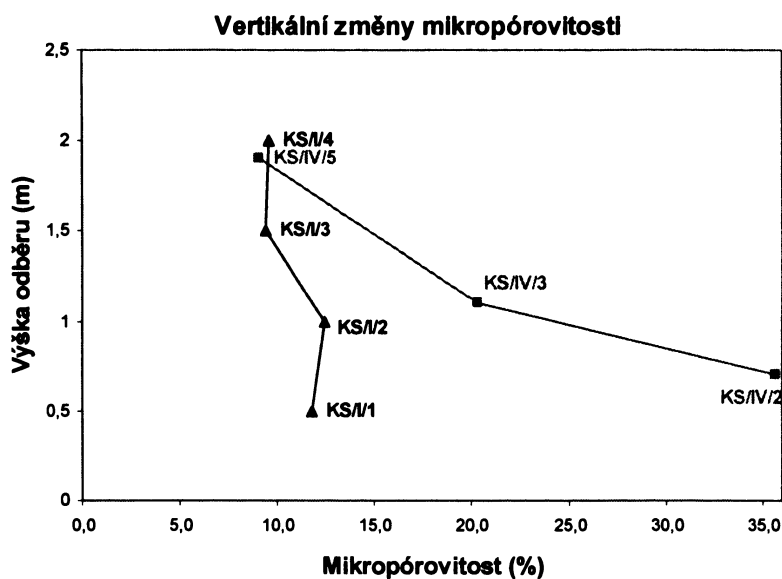
Vícezdrojový model lze také potvrdit tím, že soli na stěnách nekrystalizují vertikálně v pořadí podle rozpustnosti, jak je tomu u modelu Arnolda a Zehndera (1990), kdy by měly být maximální koncentrace síranů v nižších polohách do 0,5 m a dusičnanů výše, mezi 0,5 a 1 m. Vertikální koncentrační průběh dusičnanů je téměř shodný s vertikálními změnami síranů ve všech studovaných stěnách. Chloridy, které by měly krystalizovat v nejvyšších polohách, se v dané oblasti objevují jen v nízkých koncentracích, shodných ve všech výškových úrovních.

#### 7.4 Změny fyzikálních vlastností hornin

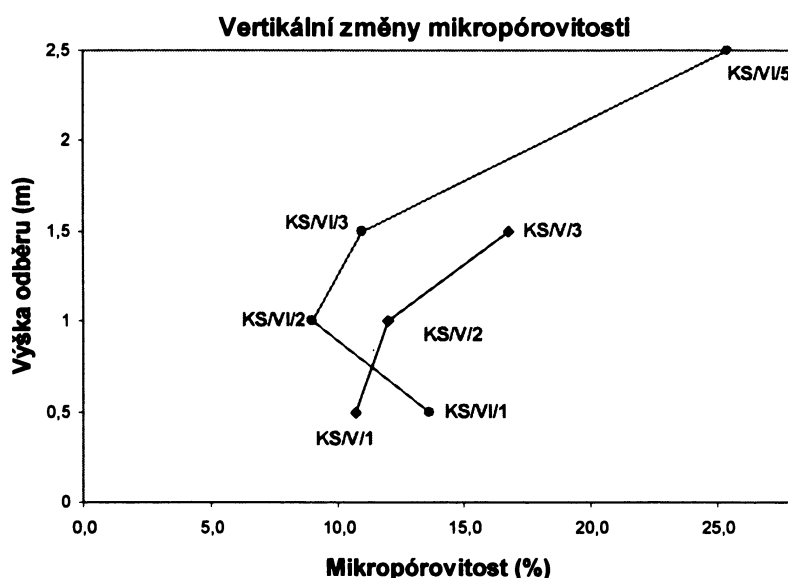
Z grafů na Obr. 24, 26, 28 a 30 je patrné, že vývoj fyzikálních vlastností horniny ve vertikálním profilu souvisí se změnami koncentrace solí. Z výsledků vyplývá, že dochází k nárůstu celkové pórovitosti společně s růstem koncentrace síranů a dusičnanů. S objemem pórů roste i množství vody, které může hornina zadržet. V závislosti na celkové pórovitosti se tedy mění i hodnoty vlhkosti a nasákavosti hornin. Množství přítomné vody v hornině ovlivňuje mobilitu solí a tedy i solné a také mrazové zvětrávání. Krystalizace solí v pórovém prostoru způsobuje jeho změny, které pak zpětně ovlivňují další zvětrávání.

Pórovitost horniny je důležitou charakteristikou, která odráží její fyzikální stav. Výrazný nárůst pórovitosti vede často ke zhoršení mechanických vlastností horniny (Goudie 1999), kterými jsou zejména tahová a tlaková pevnost. Příkladem jsou vysoké hodnoty pórovitosti horniny ze severního defilé Křídelních stěn, hlavně u vzorku KS/I/1, kdy se celková pórovitost rovná téměř 44 obj. %. Tyto vzorky se vyznačují výrazným drolivým rozpadem a velmi nízkou soudržností.

Kromě celkového objemu pórů mají vliv na zvětrávací procesy i další vlastnosti pórového prostoru, jako je velikost, povrch, tvar a propojení pórů. Metodou Hg porozimetrie byly zjištěny také změny mikropórovitosti, měřené v rozsahu pórů 3,7 a 7500 nm, ve vertikálním profilu stěn (Obr. 32 a 33).



Obr. 32. Vertikální změny mikropórovitosti (v obj. %) v severním (KS/I) a jižním (KS/IV) defilé Křídelních stěn.



Obr. 33. Vertikální změny mikropórovitosti (v obj. %) ve východním (KS/V) a západním (KS/VI) defilé Křídelních stěn.

Při porovnání s grafy 33 až 39 lze konstatovat, že k nárůstu mikropórovitosti dochází společně s nárůstem koncentrace přítomných solí a ve většině případů i celkové pórovitosti. Zajímavá situace je u vzorku KS/IV/2, který se vyznačuje nejnižší celkovou pórovitostí (16,3 obj. %) a zároveň vykazuje vysokou mikropórovitost, kdy póry v oblasti 3,7 a 7500 nm tvoří 35,7 % celkové pórovitosti. Mikroskopické studium tohoto vzorku ukázalo, že jde o horninu se silnou druhotně zpevněnou skalní kůrou, kde je pórový prostor v povrchové vrstvě vyplněn druhotnou silicifikací a oxyhydroxidy Fe.

Z výsledků Hg porozimetrie (Příloha IV) je také zřejmé, že v důsledku zvětrávání dochází ke změnám velikostního rozdělení pórů. Například u vzorků z jižní stěny je vidět nárůst pórů ve velikostním rozmezí 3 500 – 4000 nm u vzorků s vyšší koncentrací solí (výška 1,1 a 1,9 m) oproti méně porušeným vzorkům.



Změny pórového prostoru byly sledovány také pomocí mikroskopie v ultrafialovém světle. V některých vzorcích byl viditelný mírný nárůst objemu pórů v povrchové vrstvě, způsobený pravděpodobně ztrátou soudržnosti vlivem krystalizace solí. Ve studovaných horninách se nacházejí jemné intragranulární trhliny uvnitř klastů a při povrchu také průběžné exfoliační trhliny. Oboje jsou pravděpodobně výsledkem působení tlaků krystalizujících solí a mrznoucí vody. Přítomnost a velikost trhlín a puklin může významně ovlivnit transport roztoků v hornině.

## 8 ZÁVĚR

Svrchnokřídové křemenné pískovce Křídelních stěn v Národním parku České Švýcarsko jsou bohaté na projevy solného zvětrávání. Na horninovém povrchu se v hojné míře vyskytují bílé až šedé solné krusty a výkvěty, reliéf skalního povrchu je tvořen voštinami, skalními dutinami, římsami a převisy. Povrch je často kryt druhotně zpevněnou šedou až černou skalní kůrou, která se na mnoha místech odlupuje a opadáva. Na obnažených horninách je patrný výrazný drolivý rozpad.

Solné krusty jsou tvořeny převážně sírany, v menší míře chloridy a dusičnany. Nejčastěji se vyskytující minerální fáze je sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), velice hojný je také  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Mezi další Al-sírany solných krust této oblasti patří čermíkit ( $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), alunit ( $\text{K}(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ ) a alunogen ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ ). Jako minoritní složka se v krustách vyskytuje hydrofilit ( $\text{CaCl}_2$ ) a nitramit ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). V jednom vzorku byl identifikován  $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$  a anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ).

Výskyt solných výkvětů (krust) na horninovém povrchu je do určité míry ovlivněn geografickými parametry a rozpustností solí. Více rozpustné fáze se vyskytují spíše v místech chráněných vůči povětrnostním vlivům (dutiny, převisy) a na skalních stěnách exponovaných ke světové straně s menším vymýváním, popř. vyšší intenzitou a délkou slunečního svitu. Nejrozpuštěnější soli ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) krystalizují hlavně na jižní straně stěn, rozpustné soli se nachází také na východní a západní stěně. Na exponované severní stěně krystalizuje pouze málo rozpustný sádrovec a  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

Složení solných krust studované oblasti je ovlivněno kromě mineralogie horniny také chemickým složením srážek, které vyplývá z atmosférického znečištění oblasti. Na tvorbě solných krust se podílí atmosférický  $\text{SO}_2$ , snížené pH srážek má za následek vyluhování alkálií a Al vázaných v minerálech. Výsledkem je krystalizace Al-K-bohatých síranů, které jsou pro tuto oblast typické a mají silné zvětrávací účinky.

Distribuce solí v přírodních horninových výchozech se liší od rozložení solí ve zdivu exteriéru budov. Rozložení solí ve vertikálním profilu Křídelních stěn je ovlivněno jak vztlínající vlhkostí, tak i vlhkostí prosakující z vyšších partií stěny, v závislosti na její členitosti a výšce. U členitých stěn se v profilu do 2 až 2,5 m nad terénem objevují dvě maximální hodnoty koncentrace solí. Nižší (0,5 – 1 m) je způsobená vztlínající vlhkostí, vyšší (2 – 2,5 m) nahromaděním solí přinesených vlhkostí z vyšších partií stěny.

Změny fyzikálních vlastností hornin souvisí se změnami koncentrace solí v hornině. Společně s rostoucí koncentrací síranů a dusičnanů dochází k zvýšení pórovitosti, vlhkosti, nasákavosti a tím i náchylnosti horniny vůči zvětrávání. Nárůst pórovitosti se projevuje i nárůstem mikropórovitosti v oblasti pórů 3,7 a 7500 nm a změnami jejich velikostního rozdělení. Nárůst objemu pórového prostoru je patrný zejména v povrchové vrstvě horniny. Dalšími projevy solného zvětrávání je přítomnost exfoliačních trhlin a intraklastických trhlin vzniklých působením tlaků krystalizujících solí a mrznoucí vody.

## 9 POUŽITÁ LITERATURA

- Adamson A.W., 1967. *Physical Chemistry of Surfaces*. Interscience Publishers, New York.
- Arnold A., Zehnder K., 1990. *Salt weathering on monuments*. Advanced Workshop. Analytical methodologies for the investigations of damaged stones. Pavia, Italy, September 14-21, 58 str.
- Balatka B., Sládek J., 1980. *Členění reliéfu ČSSR*. Lidé a Země, 2, 80. Academia, Praha, 70-74.
- Balatka B., Sládek J., 1984. *Typizace reliéfu kvádrových pískovců české křídové tabule*, Rozpr. ČSAV, 94, 6, Academia, Praha, 7 - 67.
- Beyer O., 1911. *Alaun und Gips als Mineralneubildungen and als Ursachen der chemischen Verwitterung in den Quadersandsteinen des sächsischen Kreidegebietes*. Z. dt. geol. Ges., 63(4), 429-467.
- Blanck E., Evila H., 1932. *Beitrag zur frage nach der Herkunft der im Gestein und Boden zirkulierenden sulfathaltigen Lösungen, sowie zum Kreislauf des Sschwefels in der Natur*. Chemie der Erde, 10, 218-318.
- Breiter K., 1976. *Výskyt sulfátů na kvádrových pískovcích svrchní křídý v severních Čechách*. Sborn. Severočes. Mus. Ser. Natur., 8, Liberec, 99-107.
- Buzek F., Šrámek J., 1985. *Sulfur isotopes in the study of stone monument conservation*. Studies in Conservation 30(4), 171-176.
- Buzek F., Černý J., Šrámek J., 1991. *Sulphur isotope studies of atmospheric S and the corrosion of monuments in Prague, Czechoslovakia*. In: Krouse H.R., Grinenko V.A., (eds.), Stable isotopes, natural and anthropogenic sulphur in the environment, SCOPE 43, J. Wiley & Sons, Chichester, 399-405.
- Cílek V., 1993. *Alunit a arkanit z pískovcového pseudokrasu na Kokořínsku*. Minerál, 2, Přetisk z „Krasových sedimentů.“ 140 – 141.
- Cílek V., Langrová A., 1994. *Skalní kůry a solné zvětrávání v CHKO Labské pískovce*. Ochrana přírody, 49 (8), Agentura ochrany přírody a krajiny, Praha, 227-231.
- Cílek V., 1997. *Sandstone phenomenon: antagonism between surface hardening and salt weathering*, Geologia 39, 33 – 38.
- Cílek V., 1998. *Hydroxidy a sole hliníku v životním prostředí*. Ochrana přírody, 53 (7), Agentura ochrany přírody a krajiny, Praha, 210-212.
- Dragovich D., 1969. *The origin of cavernous surface (tafoni) in granitic rocks of southern South Australia*. Zeitschrift für Geomorphologie, 13, 163 – 181.
- Dudek A., Fediuk F., Palivcová M., 1962. *Petrografické tabulky. Příručka petrografické mikroskopie s atlasem struktur a textur*. Nakl. ČSAV, Praha. 303 str.
- Futterer K., 1899. *Urban Windkorrasion am Heidelberg Schlossturm*. Mitteilungen der grossherzoglichen badischen geologischen Landesanstalt, 5, 471 – 495.

- Garcia-Valles M., Molera J., Vendrell-Saz M., 1997. *A siliceous sandstone in an urban environment: the decay and cleaning of the Church Betlem (Barcelona, Catalonia)*. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 3(5), 469-485.
- Goodman R.E., 1989. *Introduction to rock mechanics*. 2. vydání, John Wiley & Sons, New York, 562 str.
- Goudie A., 1999. *Experimental salt weathering of limestones in relation to rock properties*. Earth Surface Processes and Landforms, 24,715-724.
- Goudie A., Viles H., 1997. *Salt weathering hazards*. Wiley & Sons, Chichester, 241 str.
- Halsey D.P., Dews S.J., Mitchell D.J., Harris F.C., 1996. *The black soiling of sandstone buildings in the West Midlands, England: regional variations and decay mechanisms*. In: Smith B.J. and Warke P.A. (eds.) Processes of Urban Stone Decay. Donhead Publishing Ltd, London, str. 53-65.
- Holeček J., 2004. *Zvětrávací procesy sedimentárních hornin východočeské křídly*. Diplomová práce ÚGMNZ, PřF UK, 62 str. + 4 přílohy.
- Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z., 2002. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 str.
- Chvátal M., 1999. *Mineralogie pro první ročník – krystalografie*. Skripta PřF UK, Karolinum, Praha, 179 str.
- Klear W., 1956. *Verwitterungsformen in Granit auf Korsika*. Petermanns Geographische Mitteilungen, 261, str. 146.
- Krumbein W. (ed), 1993. *Microbial Geochemistry*. Blackwell, Oxford.
- Kříž J. (ed.), 2000. *Lower Paleozoic, Upper Cretaceous and Quaternary of Bohemia*. Excursion guidebook, ČGS, Praha, 32-33.
- Kukal Z., Reichmann F., 2000. *Horninové prostředí České republiky: jeho stav a ochrana*. ČGÚ, Praha, 189 str.
- Laue S., 1995. *Climate controlled behaviour of soluble salts in the crypt of St.Maria im Kapitol, Cologne*. In: Preservation and restoration of cultural heritage, LCP Congress, Montreux, 447 – 454.
- Longinelli A., Bartelloni M., 1978. *Atmospheric pollution in Venice, Italy, as indicated by isotope analyses*. Water, Air and Soil Pollution, 10, 335-341.
- Machill S., Althaus K., Krumbein W.E., Steger W.E., 1997. *Identification of organic compounds extracted from black weathered surfaces of Saxonean sandstones, correlation with atmospheric input and rock inhabiting microflora*. Organic Geochemistry, 27(1-2), 79-97.
- Malkovský M., Benešová Z., Čadek J., Holub V., Chalopský J., Jetel J., Miller V., Mašín J., Tásler R., 1974. *Geologie české křídové pánve a jejího podloží*. Ústřední ústav geologický, Academia, Praha, 262 str.
- Marsh H., Rodríguez-Reinosso F., 2000. *Sciences of Carbon Materials*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante, Spain.

- Mikuláš R., 2001(a). *Gravity and orientated pressure as factors controlling "honeycomb weathering" of the Cretaceous castellated sandstones (northern Bohemia, Czech Republic)*. Věst. Česk. geol. Úst., 76 (4), 217-226.
- Mikuláš R., 2001(b). *Poznámky ke vzniku některých prvků mikroreliefu pískovcových skal*. Ochrana přírody. 56 (1), Agentura ochrany přírody a krajiny, Praha. 19 – 21.
- Mustoe G.E., 1982. *The origin of honeycomb weathering*. Geol. Soc. Am. Bull. 93, 108 – 115.
- Němcová I., Čermáková L., Rychlovský P., 1997. *Spektrometrické analytické metody I*. Skripta PřF UK, Karolinum, Praha, 166 str.
- Nishiyama T., Kusuda H., 1994. *Identification of pore spaces and microcracks using fluorescent resins*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31: 369-375.
- Nord A.G., Ericson T., 1993. *Chemical analysis of thin black layers on building stone*. Studies in Conservation, 38, 25-35.
- Novák V.J., 1914. *O formách kvádrových pískovců v Čechách*. Rozpr. Čs. Akademie, II, 23 (19), 1 – 25.
- Novák M., Jačková I., Přečková E., 2001. *Temporal trends in the isotope signature of air-borne sulfur in Central Europe*. Environ. Sci. Technol., 35, 255-260.
- Ollier C., 1969. *Weathering*. Oliver & Boyd, Edinburg, 304 str.
- Opekar F., Jelínek I., Rychlovský P., Plzák Z., 2002. *Základní analytická chemie*. Skripta PřF UK, Karolinum, Praha, 201 str.
- Pauli J., Holoušová T., 1994. *Mechanika hornin, laboratorní zkoušky hornin*. ČVUT, Praha, 163 str.
- Příkryl R., 1998. *The effect of rock fabric on some mechanical properties of rocks: an example of granites*. Doktorská disertace PřF UK, Praha, 154 str.
- Příkryl R., Soukupová J., 2001. *Výzkum mechanismů vedoucích ke vzniku zvětrávacích krust sedimentárních hornin v přirozeném a znečištěném prostředí*. Nepublikovaná výzkumná zpráva pro Ministerstvo životního prostředí ČR, 21 str.
- Příkryl R., Svobodová J., Žák K., Hradil D. (2004): *Anthropogenic origin of salt efflorescences on sandstone sculptures (Charles bridge, Prague, Czech Republic) – mineralogical and stable isotope geochemistry evidence*. European Journal of Mineralogy, 16(4), 609-617.
- Příkryl R., 2005. *Petrografický rozbor hornin ze stěn kaple sv. Máří Magdalény v chrámu sv. Víta na Pražském hradě*. Nepublikovaná výzkumná zpráva pro kancelář prezidenta republiky, odbor památkové péče, Praha, 19 str.
- Pye K., Schiavon N., 1989. *Cause of sulphate attack on concrete, render and stone indicated by sulphur isotope ratios*. Nature, 342, 663-664.
- Pye K., Mottershead D.N., 1994. *Tafoni on coastal slopes*. Earth Surf. Process. Landforms 19, 543 – 563.

- Pye K., Mottershead D.N., 1995. *Honeycomb weathering of Carboniferous sandstone in a sea wall at Weston-super-Mare, UK*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 333 - 347.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., 1999. *Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern*. Earth Surf. Process. Landforms 24, 191- 209.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., 1999. *Origins of honeycomb weathering: The role of salt and wind*. Geol. Soc. Am. Bull., 111, 8, 1250 – 1255.
- Rodriguez-Navarro C., Sebastian E., 1996. *Role of partikule matter from vehikle exhaust on porous building stones (limestone) sulphation*. The Science of the Total Enviroment 187, 79 -91.
- Rossi-Manaresi R., Tucci A., 1991. *Pore structure and the disrupting or cementing effect of salt crystallization in various types of stone*. Studies in conservation 36, 53 - 58.
- Rubín J., Balatka B., Ložek V., Malkovský M., Pilous V., Vitek J., 1986. *Atlas skalnich, zemnich a půdnich tvarů*. Academia. Praha. 388 str.
- Sabbioni C., Zappia G., 1992. *Decay of sandstone in urban areas correlated with atmospheric aerosol*. Water, Air and Soil Pollution, 63, 305-316.
- Schmidt-Thomsen K. 1969. *Zum Problem der Steinzerstörung und Konservierung*. Dtsch. Kunst und Denkmalpflege, pp. 11-23.
- Schön J.H., 2004. *Physical Properties of Rocks. Handbook of geophysical exploration, seismic exploration*. Volume 18, Elsevier, Amsterdam, 583 str.
- Siedel H., Klemm W., 2000a. *Evaluation of the environmental influence on sulphate salt formation at monuments in Dresden (Germany) by sulphur isotope measurements*. Proceedings of 9th International Congress on deterioration and Conservation of Stone, Venice (Italy), June 19-24, 2000, str. 401-409.
- Siedel H., Klemm W., 2000b. *Suplhate salt efflorescence at the surface of sandstone monuments and at the sandstone bedrock in outcrops – natural or anthropogenic reasons?* Schriften des staatlichen Museums für Mineralogie und Geologie zu Dresden 11: 109.
- Siedel H., Klemm W., 2001. *Sulphate salt efflorescence at surface of sandstones monuments and the sandstone bedrock in outcrops – natural or anthropogenic reason?* Geologica saxonica 46/47: 203-208.
- Smith B.J., Turkington A.V., Curran J.M., 2001. *Calcium loading of quartz sandstones during construction: Implications for future decay*. Earth Surface Processes and Landforms, 26(8), 877-883.
- Snethlage R., 1984. *Steinkonservierung 1979-1983*. Ber für die Denkmalpflege. Arbeitshefte des Landesamtes für Denkmalpflege, 22, 203 pp.
- Soukupová J., Hradil D., Přikryl R., 2002a. *Chemical weathering of clay-rich sandstone matrix – control and case studies*. In: Přikryl R., Viles H.A. (eds.): Understanding and managing stone decay, Karolinum, Praha, 263 – 271.
- Soukupová J., Žák K., Přikryl R., 2002b. *Isotopic composition of salt efflrescence from non-carbonate arenites exposed in rock cities of Bohemian Cretaceous basin (Czech Republic)*. Biogeomon, Book of Conference abstracts, The university of Reading, UK, str. 218.

Steger W.A., Mehner H., 1998. *The iron black weathering crusts on Saxonian sandstones investigated by Mössbauer spectroscopy*. Studies in Conservation, 43, 49-58.

Stumm W., Morgan J.J., 1998. *Aquatic Chemistry*, John Willey and Sons, New York, 1022 str.

Turkington A.V., 1998. *Cavernous weathring in sandstone: lessons to be lerned from natural exposure*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 31, 375 - 383.

Valečka J., 1989. *Sedimentology, stratigraphy and cyclicity of the Jizera Formation (Middle – Upper Turonian) in the Děčín area (N Bohemia)*. Věst. Ústř. Úst. geol., 64 (2), ÚÚG, Praha, 77 – 90.

Valečka J. (ed.), 1997. *České Švýcarsko – geologická a přírodovědná mapa 1:25 000*. ČGÚ, Praha.

Valečka J., 2000. *Geologie národních parků České republiky – České Švýcarsko*. ČGÚ, Praha.

Vařilová Z., 2002. *A review of selected sandstone weathering forms in the Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic* In: Přikryl R., Viles H.A. (ed.): Understanding and managing stone decay, Karolinum, Praha, 233 – 242.

Vos B.H., Tammes E., 1969. *Flow of water in the liquid phase*. Rep. č. B 1-68-38, Inst TNO for builing materials and building structures, Delft, 45 str.

Wakefield R.D., Jones M.S., Forsyth G., 1996. Decay of sandstone colonised by an epilithic algal community. In: Smith B.J., Warke P.A. (eds.) Processes of Urban Stone Decay. Donhead Publishing Ltd, London, str. 88-97.

Williams R. B. G., Robinson D. A., 1998. *Weathering of sandstone by alunogen and alum salts*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 31, 369 - 373.

Williams R.B.G., Robinson D.A., 2000. *Effects of aspect weathering: Anomalous behaviour of sandstone gravestones in southeast England*. Earth Surface Processes and Landforms, 25, 135-144.

Winkler E. M., 1994. *Stone in Architecture – Properties, Durability*. Springer-Verlag, Berlin, 313 str.

Young A.R.M., 1987. *Salt as an agent in the development of cavernous weathering*. Geology, 15. 962 – 966.

Zehnder K., 1996. *Gypsum efflorescence in the zone of rising damp. Monitoring of slow decay processes caused by crystallizing salts on wall paintings*. In: Proceedings 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Ernst und Sohn, Berlin, 1669 – 1678.

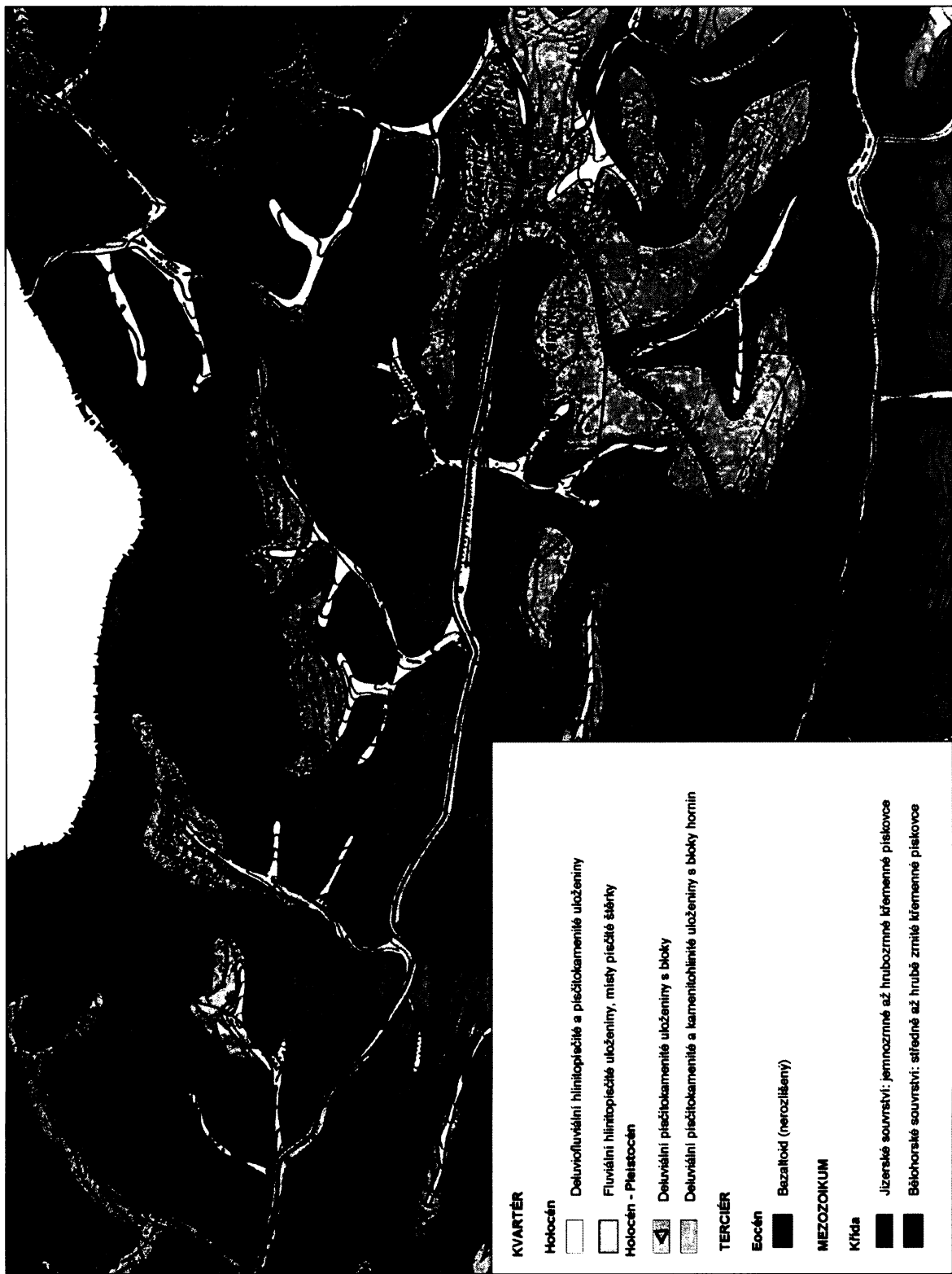
Zvelebil J., Cílek V., Stemberk J., 2002. *Partial results of monitoring of stability deterioration on Pravčice Rock Arch, NW Bohemia*, In: Přikryl R., Viles H.A. (ed.): Understanding and managing stone decay, Karolinum, Praha, 243 – 261.

[http://www.npcs.cz/public/npcs\\_cs/cz.html](http://www.npcs.cz/public/npcs_cs/cz.html), 9.3. 2006.

## **PŘÍLOHA I:**

**Mapa znázorňující geologickou stavbu okolí Křídelních stěn  
podle Valečky (1997)**





Obr 1 -1. Geologická mapa okolí Křídelních stěn. Převzato od *Valečky (1997)*



## **PŘÍLOHA II:**

**Bližší popis odběrových míst a odebraných vzorků**

## Severní defilé Křidelních stěn (profily I a II)

### Popis stěny

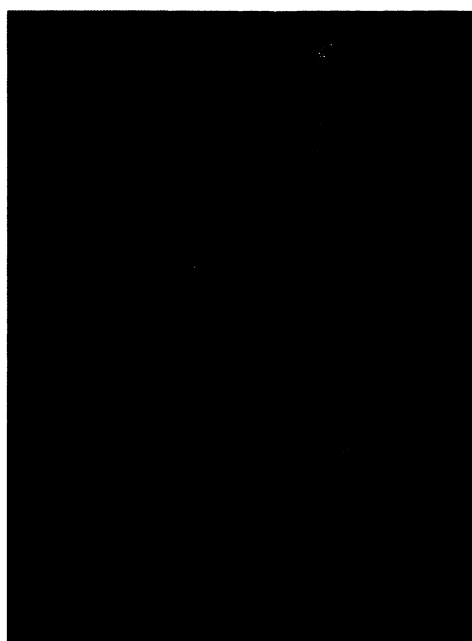
Severní stěna je rovná, kolmá, bez říms a výrazných výběžků. Je tvořena světle žlutým, místy rezavým pískovcem s výrazným drolivým rozpadem. Ve spodní části (0,5 – 3 m) je povrch horniny obnažený (Obr. II-1), vyskytují se zde voštiny ale i dutiny až 0,7 m hluboké, které často sledují sedimentární vrstevnatost – jsou protaženy do sedimentárních ploch. Asi od 3 m výše je hornina pokrytá horninovou krustou šedé až černé barvy. Mezi 4 až 10 m se snižuje výskyt zvětrávacích jevů, místy se objevují voštiny přibližně 1 cm hluboké. Nad 10 m je stěna téměř bez zvětrávacích jevů. Solné výkvěty byly odebrány z rovné části stěny bez zvětrávacích tvarů, na povrchu tmavé zpevněné skalní kůry (Obr. II-2). Přehled odebraných vzorků uvádí Tab. II-1.

Tab II-1. Vzorky odebrané v severním defilé Křidelních stěn.

číslo vzorku	popis vzorku	místo odběru	výška odběru
KS/I/1	hornina - profil I	obnažený povrch horniny bez skalní kůry	0,5 m
KS/I/2	hornina - profil I		1 m
KS/I/3	hornina - profil I		1,5 m
KS/I/4	hornina - profil I	povrch šedé skalní kůry	2 m
KS/I/5	hornina - profil I		2,5 m
KS/II/1a	solný výkvět - profil II	povrch šedé skalní kůry	0,5 - 0,6 m
KS/II/2a	solný výkvět - profil II		1 - 1,1 m
KS/II/3a	solný výkvět - profil II		2 - 2,2 m
KS/II/4a	solný výkvět - profil II		0,5 - 0,6 m



Obr. II-1. Spodní partie severní stěny, místo odběru horninových vzorků KS/I/1-5 (foto R. Přikryl).



Obr. II-2. Odběrové místo solných výkvětů KS/II/1a 4a (foto R. Přikryl).

## Jižní defilé Křídelních stěn (vzorek III, profil IV)

### Popis stěny

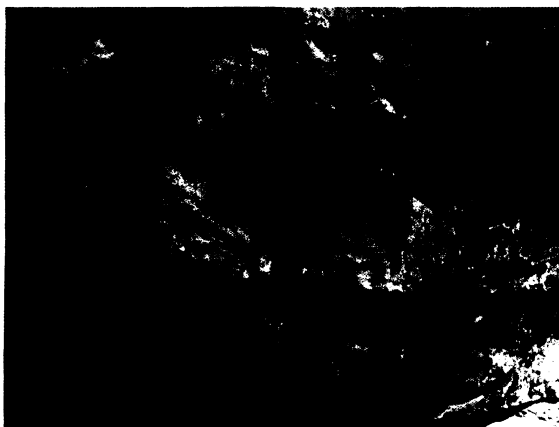
Jižní stěna je rovná, kolmá, ve spodní části asi do 1,5 m převislá (Obr. II-3). Sytě žlutý pískovec s okrovými polohami má asi do výšky 1,5 m obnažený povrch, místy se zbytky skalní kůry (Obr. II-4). Převis je rozčleněn skalními dutinami a výklenky, které sledují sedimentární vrstevnatost. Mezi 1,5 - 3 m je hornina kryta šedou skalní kůrou, která se na mnoha místech odlupuje a opadává. Mezi 3 m až přibližně 9 m je skalní kůra členěna malými mělkými voštinami, jejichž četnost se s výškou snižuje. Kolem 6 m se nachází po celé délce stěny více zvětralá poloha s dutinami a římsami, které jsou místy porostlé vegetací. Ve výšce nad 9 m je povrch horniny tvořen pouze šedou hladkou skalní kůrou. Solné výkvěty (Obr. II-5, II-6) byly odebrány z obnaženého horninového povrchu, šedé skalní kůry i uvnitř voštin. Přehled odebraných vzorků uvádí Tab. II-2.

Tab. II-2. Vzorky odebrané v jižním defilé Křídelních stěn.

číslo vzorku	popis vzorku	popis vzorku	místo odebrání	výška odebrání
KS/III/1	hornina + solný výkvět	středně šedá – černá, mokrá lepivá hmota na skalní kůře (Obr. II-5)	povrch šedé kůry na svislé stěně	1,8 m
KS/IV/1	hornina - profil IV	žlutý pískovec + skalní kůra	kůra z dutiny, obnažená hornina z místa nad dutinou	0,35 m
KS/IV/2	hornina - profil IV	žlutý - okrový pískovec s černou skal. kůrou a solnými výkvěty	boční stěna dutiny – zpevněná krusta	0,7 m
KS/IV/2.1	hornina - hloubkový profil	žlutý, drobný pískovec se skalní kůrou na povrchu	0 - 1 cm do hloubky, boční stěna dutiny (20 cm hluboké)	
KS/IV/2.2			1 - 3 cm do hloubky, boční stěna dutiny	
KS/IV/2.3			3 - 5 cm do hloubky, boční stěna dutiny	
KS/IV/2.4			5 - 6 cm do hloubky, boční stěna dutiny	
KS/IV/3	hornina - profil IV	- pískovec s šedou skal. kůrou	povrch horniny se skalní kůrou	1,1 m
KS/IV/4.1	hornina - profil IV	- pískovec s tmavě šedou - černou skalní kůrou		1,6 m
KS/IV/4.2	hornina - profil IV	žlutý pískovec bez povrch. krusty, drobný rozpad	hornina pod povrchem (pod KS/IV/4.1)	1,6 m
KS/IV/5	hornina - profil IV	tmavě žlutý pískovec, místy se světle šedou krustou	na povrchu šedé skalní kůry	1,9 m
KS/IV/1a	solný výkvět - profil IV	bílá solná krusta, na povrchu šedá	uvnitř voštin 1×1 cm	0,35 m
KS/IV/2a	solný výkvět - profil IV		uvnitř voštiny 2×2 cm	0,7 m
KS/IV/3a	solný výkvět - profil IV	šedá solná krusta	povrch šedé skalní kůry nad voštinou	1,1 m
KS/IV/4a	solný výkvět - profil IV	bílá - světle šedá solná krusta, tenká práškovitá vrstvička (Obr. II-6)	na šedém horninovém povrchu	1,5 m
KS/IV/5a	solný výkvět - profil IV	bílá - světle šedá solná krusta, tenká vrstvička	obnažená hornina, strop dutiny	1,8 - 1,9 m
KS/IV/6a	solný výkvět - profil IV	bílá - světle šedá solná krusta, tenká práškovitá vrstvička	na obnažené hornině, boční stěna dutiny 10×10 cm	2,1 - 2,2 m



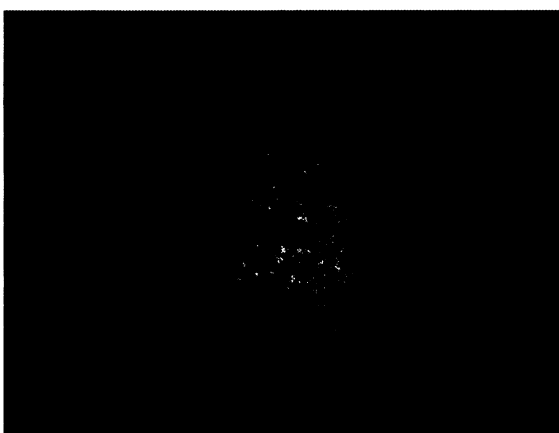
Obr. II-3. Převis ve spodní části jižní stěny  
(foto R. Přikryl).



Obr. II-4. Místo odběru horninových vzorků na  
jižní stěně (foto R. Přikryl).



Obr. II-5. Solný výkvět, vzorek KS/III/1  
(foto R. Přikryl).



Obr. II-6. Práškové solné výkvěty na obnažené  
hornině, vzorek KS/IV/4a (foto R. Přikryl).

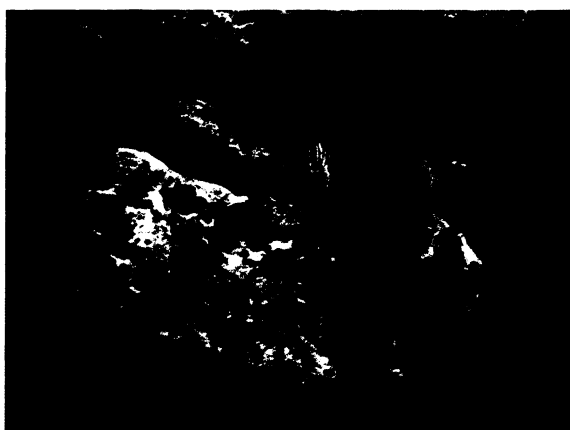
## Východní defilé Křídelních stěn (profil V)

### Popis stěny

Kolmá stěna, ve spodní části do výšky 1 m se nachází až 1 m hluboký převis s obnaženým horninovým povrchem, rozčleněný skalními dutinami a voštinami. Od 1 m výše je horninový povrch tvořen drobnými voštinami protaženými ve směru sedimentace a zpevněnými černou skalní kůrou (Obr. II-9), která na některých místech opadáva (Obr. II-7). Ve výšce mezi 5 až 6 m se nachází asi 0,8 m hluboký otevřený převis, porostlý vegetací (mechy, tráva, malá bříza). Svisle probíhá stěnou asi 0,5 m široká puklina, která viditelně zadržuje vlhkost. Ve výšce nad 6 m je hornina, světle žlutý až žlutý drobný pískovec, zpevněna skalní kůrou, na které se vyskytují drobné voštiny. Solné výkvěty byly odebrány z povrchu obnažené horniny v převislé části stěny (Obr. II-8) nebo z povrchu tmavé skalní kůry ve vyšších polohách. Přehled odebraných vzorků uvádí Tab. II-3.

Tab II-3. Vzorky odebrané ve východním defilé Křídelních stěn.

číslo	typ vzorku	popis vzorku	místo odběru	výška odběru
KS/V/1	hornina - profil V	žlutý drobný pískovec s černou povrchovou kůrou	svislá, rovná stěna s povrchovou kůrou	0,5 m
KS/V/2	hornina - profil V			1 m
KS/V/3	hornina - profil V	žlutý drobný pískovec bez skalní kůry	obnažená boční stěna dutiny (20×20 cm)	1,5 m
KS/V/4	hornina - profil V	světle žlutý pískovec s černou skalní kůrou	svislá, rovná stěna s povrchovou kůrou a voštinami	2 m
KS/V/1a	solný výkvět - profil V	bílá – šedá solná krusta, tenká vrstva	na povrchu šedé krusty, mezi mělkými voštinami	0,4 - 0,5 m
KS/V/2a	solný výkvět - profil V			1 - 1,1 m
KS/V/3a	solný výkvět - profil V			bílá, na povrchu šedá krusta
KS/V/4a	solný výkvět - profil V	bílé, mazlavé keříčkovité výkvěty		1,7 m
KS/V/5a	solný výkvět - profil V	bílá - světle šedá krusta		1,8 m
KS/V/6a	solný výkvět - profil V	bílá, na povrchu tmavě šedá krusta		2,1 m
KS/V/7a	solný výkvět	bílá - světle šedá, místy rezavá solná krusta	uvnitř svislé vlhké spáry (šířka 0,5 m), na povrchu šedé kůry, asi 3 m od profilu V	5 m
KS/V/8a	solný výkvět	bílá - světle šedá krusta	na povrchu obnažené horniny, ve vyvětralé poloze pod převisem, asi 3 m od profilu V	6 m
KS/V/9a	solný výkvět	bíle - světle šedé keříčkovité mazlavé výkvěty, místy rezavé		6 m



Obr. II-7. Část východní stěny ve výšce kolem 4 -5 m s polohami s opadanou skalní kůrou (foto R. Přikryl)



Obr. II-8. Solné výkvěty v převislé části východní stěny (foto R. Přikryl).



Obr. II-9. Východní stěna s vertikálně protaženými voštinami zpevněnými skalní kůrou (foto R. Přikryl).

## Západní stěna (vzorky VI a VII)

### Popis stěny

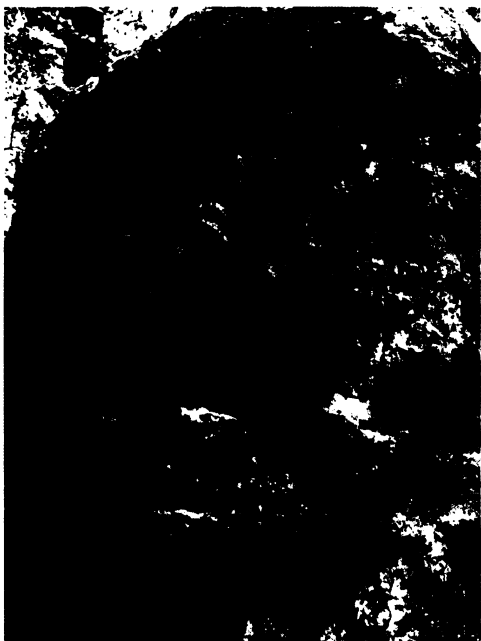
Stěna VI je kolmá, poměrně členitá a asi 8 m vysoká. Nachází se přibližně 20 m nad turistickou cestou a na jejím vrcholu je půdní pokryv s vegetací včetně stromového patra. Ve spodní části do 1,5 m je povrch tvořený voštinami o velikosti až 5 cm a hloubce 2 cm, které jsou zpevněné šedou až černou skalní kůrou. Voštiny často tvarově kopírují sedimentární vrstevnatost. Ve výšce asi 2 m se objevuje horizontálně protažená vyvětralá poloha s asi 0,4 m hlubokým a stejně vysokým převisem pod kterým je hornina místy obnažená s viditelným opadem skalních kůr (Obr. II-10, II-11). Ve výšce nad 2 m se nachází voštiny, v některých polohách se propojují ve větší dutiny a skalní hodiny, tvořené vypreparováním skalní kůry. Ve výšce od 7 m se množství voštin zmenšuje. Solné výkvěty byly odebrány z povrchu obnažené horniny (světle žlutý, místy drobnivý pískovec) nebo tmavé zpevněné skalní kůry, uvnitř dutin a záhybů skalních kůr (Obr. II-13).

Stěna VII se nachází asi 10 m nad stěnou VI v dalším skalním patře. Je to převislá stěna s velkým množstvím zvětrávacích forem, tvořená žlutým, místy okrovým rezavým pískovcem. Spodní část povrchu je tvořena voštinami o velikosti kolem 1 – 2 cm, zpevněnými skalní kůrou. Ve výšce kolem 1 m je skalní povrch obnažený, chráněný shora převislou stěnou. Nachází se zde zbytky vypreparovaných skalních kůr. Od 2,5 m nad terénem (nad úzkou cestičkou mezi patry) je povrch tvořen drobnými voštinami zpevněnými skalní kůrou (Obr. II-12). Přehled odebraných vzorků uvádí Tab. II-4.

Tab II-4. Vzorky odebrané v západním defilé Křídelních stěn.

KS/VI/1	hornina - profil VI	světle žlutý pískovec s černou kůrou	na povrchu šedá zpevněná kůra, velké množství voštin	0,5 m
KS/VI/2	hornina - profil VI			1 m
KS/VI/3	hornina - profil VI			1,55 m
KS/VI/4	hornina - profil VI	žlutý pískovec s černou kůrou		2 m
KS/VI/5	hornina - profil VI	světle žlutý drobnivý pískovec s černou kůrou		2,5 m
KS/VI/1a	solný výkvět - profil VI	bílá - světle šedá solná krusta	uvnitř voštin (1 - 2 cm) se šedou zpevněnou kůrou na povrchu	0,7 m
KS/VI/2a	solný výkvět - profil VI			1,2 m
KS/VI/3a	solný výkvět - profil VI			1,5 - 1,6 m
KS/VI/4a	solný výkvět - profil VI			2 - 2,1 m
KS/VI/5a	solný výkvět - profil VI	bílá krusta	pod převisem, obnažený povrch bez skalní kůry	2,8 m
KS/VII/1	hornina - stěna VII	žlutý - rezavý drobnivý pískovec bez skalní kůry	spodní stěna dutiny (1,5×0,5 m) obnažený povrch horniny	0,6 - 0,7 m
KS/VII/1a	solný výkvět - profil VII	bílá - světle šedá krusta	povrch skalní kůry pod dutinou	0,4 m
KS/VII/2a	solný výkvět - profil VII	bílá - světle šedá krusta, příměs zrn křemene	spodní stěna dutiny na obnaženém povrchu horniny	0,5 m
KS/VII/3a	solný výkvět - profil VII	bílá krusta - tenký povlak	povrch obnažené horniny po odloupení skalní kůry	0,8 m
KS/VII/4a	solný výkvět - profil VII	bílá krusta se šedým povrchem	povrch šedé skalní kůry nad voštinou	1 m
KS/VII/5a	solný výkvět - profil VII	bílá krusta	povrch obnažené horniny uvnitř voštiny	1,6 m
KS/VII/6a	solný výkvět - profil VII	bílá až světle šedá krusta	povrch šedé skalní kůry uvnitř voštiny	2,1 m





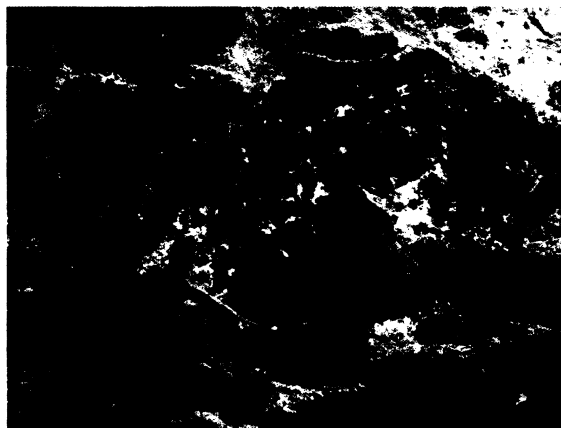
Obr. II-10. Západní stěna VI do výšky 3 m nad terénem s opadanou skalní krustou (foto R. Přikryl).



Obr. II-11. Západní stěna VII s obnaženým horninovým povrchem po opadu skalní krusty a s vypreparovanými zbytky skalní krusty (foto R. Přikryl).



Obr. II-12. Voštiny zpevněné skalní kůrou, uvnitř se solnými výkvěty (foto R. Přikryl).



Obr. II-13. Solné výkvěty na stěně VI, nacházející se hlavně na chráněných místech uvnitř dutin a v záhybech skalních kůr (foto R. Přikryl).

### **PŘÍLOHA III:**

#### **Mikroskopická charakteristika hornin Křídelních stěn**

### KS/I/1

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytříděné, velikost se pohybuje mezi 0,1 až 1,2 mm, průměrně kolem 0,3 mm. Křemen je většinou monokrystalický, místy i polykrystalický, většinou rozpukaný. Asi 1/3 zrn zháší undulózně.

Vedlejší klastické minerály: **K-živce** – 3-4 obj. % klastů, drobné klasty o velikosti do 0,4 mm, místy hnědě zakalené – sericitizované.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín**.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – pokrývají některá zrna křemene, **jílové minerály** – velmi tenký povlak na klastech, **sericit** v K-živcích.

Organická hmota: jemně rozptýlená v pórovém prostoru, povlak některých klastů.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, mezi menšími klasty izolované, o velikosti až 0,4 mm. Směrem k povrchu se zvětšují, těsně u povrchu se zmenšují, jsou zde vyplněny organickou hmotou a prachem. Pouze výjimečně se vyskytují intraklastické póry (v K-živcích).

### KS/I/2

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 97 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, místy semioválné až oválné, špatně zrnitostně vytříděné. Křemen je většinou monokrystalický (Obr. III-1), místy i polykrystalický, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost klastů se pohybuje mezi 0,1 – 1 mm, průměrně 0,2 mm, některá zrna jsou rozpukaná.

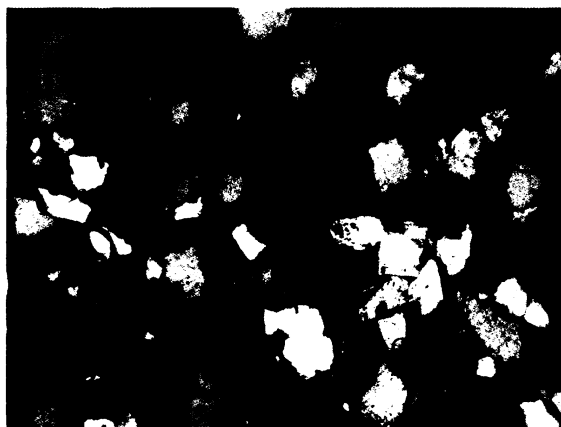
Vedlejší klastické minerály: **K-živce** – 2 obj. % klastů, drobné klasty o velikosti do 0,3 mm, místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín** (Obr. III-1), **biotit** – drobné sloupečky.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** a **jílové minerály** – pokrývají některá zrna křemene, **sericit** v K-živcích.

Organická hmota: tvoří povlaky na některých klastech.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, jen místy izolované, dosahují velikosti až 0,3 mm. Pouze výjimečně se vyskytují intraklastické póry (v K-živcích). Uvnitř některých křemenných klastů jsou tenké mikrotrhliny.



**Obr. III-1.** Monokrystalické klasty křemene, mezi kterými jsou vidět 2 zrna turmalínu. Vzorek KS/I/2, × nikoly, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).

### KS/I/3

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 94 obj. % klastů. Klasty jsou subangulární až semioválné, špatně zrnitostně vytříděné, převažuje monokrystalický křemen, místy se vyskytuje i polykrystalický, asi 1/4 zrn zháší undulózně. Velikost klastů je mezi 0,05 – 1,4 mm, průměrně 0,2 – 0,3 mm.

Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – 5 obj. % klastů, drobné klasty o velikosti do 0,4 mm, místy sericitizovaný, **muskovit** – drobné klasty, kolem 1 obj. % klastů.

Akcesorie: **turmalín**.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – pokrývají některá zrna křemene, místy vyplňují prostor mezi klasty, **jílové minerály** – místy tenký povlak na klastech, **sericit** v K-živcích.

Organická hmota: tvoří povlaky na některých klastech, nebo je jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, místy izolované, mezi většími klasty většinou propojené, dosahují velikosti až 0,3 mm. Pouze výjimečně se vyskytují intraklastické póry (v K-živcích).

#### KS/I/4

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vyříděné, velikost se pohybuje mezi 0,05 až 1,2 mm, průměrně kolem 0,3 mm. Křemen je většinou monokrystalický (Obr. III-3), místy i polykrystalický, místy rozpukaný. Asi 1/4 zháší undlůzně.

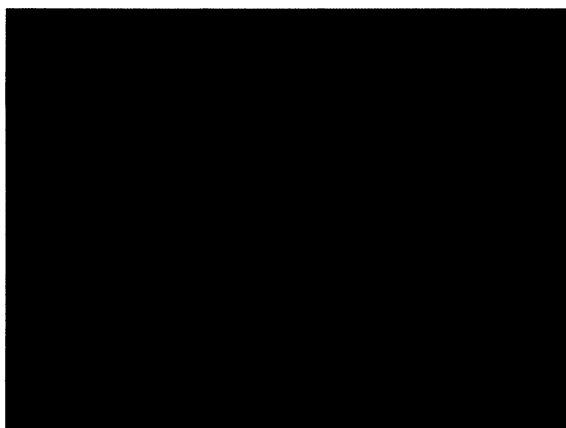
Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – cca 3 obj. % klastů, průměrná velikost 0,1 – 0,2 mm, většinou sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky i zrna o velikosti až 0,3 mm, **turmalín**, **biotit** – drobné sloupečky.

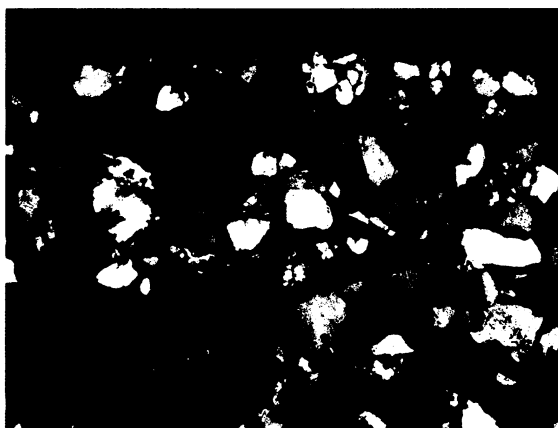
Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak na zrnech, místy roptýlený v pórovém prostoru, zvláště v povrchové vrstvě, **jílové minerály** – výjimečně tvoří tenký povlak na klastech, **sericit** v K-živcích.

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru, zvláště v povrchové vrstvě (Obr. III-2).

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, dosahují nejčastěji velikosti 0,1 mm, maximálně 0,4 mm, směrem k povrchu narůstá objem pórů, těsně pod povrchem se pórový prostor zmenšuje. Místy se vyskytují mikrotrhliny v křemenných klastech, hlavně u povrchu horniny. Výjimečně se vyskytují intraklastické póry (v K-živcích).



**Obr. III-2.** Povrchová vrstva (horní část snímku) vzorku KS/I/4. Pórový prostor je částečně vyplněn organickou hmotou a oxyhydroxidy Fe, II nikoly, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).



**Obr. III-3.** Povrchová vrstva (horní část snímku) vzorku KS/I/4. Na snímku je patrná převaha monokrystalického křemene, × nikoly, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).

### KS/I/5

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou nejčastěji subangulární, některé až semioválné, špatně zrnitostně vytrříděné, velikost je mezi 0,1 až 1,3 mm, průměrně kolem 0,4 mm. Křemen je většinou monokrystalický, místy i polykrystalický, lehce rozpukaný. Asi 1/3 zháší undlónně.

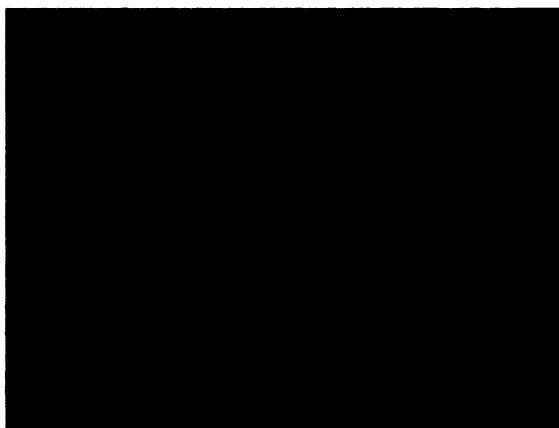
**Vedlejší klastické minerály:** **K-živce** (Obr. III-4) – 3 až 4 obj. % klastů, velikost až 0,8 mm, většinou sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky, ale i zrna o velikosti až 0,3 mm, **turmalín**, **biotit** – drobné sloupečky.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak na zrnech, místy rozptýlené v pórovém prostoru, hlavně u povrchové vrstvy, **jílové minerály** – místy tvoří tenký povlak na klastech, **sericit v K-živcích**.

**Organická hmota:** místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, místy propojené, dosahují velikosti až 0,5 mm, u povrchu jsou vyplněné organickou hmotou, oxyhydroxidy Fe a prachem. Výjimečně se vyskytují intraklastické póry (v K-živcích).



*Obr. III-4.* Klasty křemene a K-živce (tmavší) vzorku KS/I/5, II nikoly, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).

### KS/IV/1

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytrříděné, velikost se pohybuje mezi 0,05 až 1,6 mm, průměrně kolem 0,3 mm, monokrystalický křemen převažuje nad polykrystalickým, některé klasty jsou silně rozpukané. Ve vzorku je viditelné střídání jemnozrnějších a hrubozrnějších vrstev (Obr. III-5, III-6).

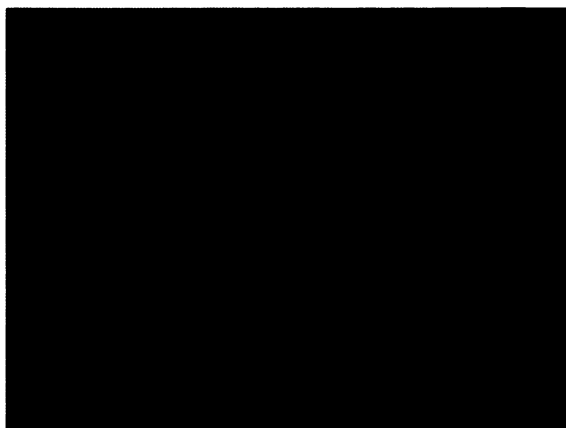
**Vedlejší klastické minerály:** **K-živce** – cca 4 obj. % klastů, velikost až 0,3 mm, většinou sericitizovaný

**Akcesorie:** **turmalín**, **muskovit** – drobné šupinky i zrna o velikosti až 0,3 mm.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak na povrchu zrn, hlavně na povrchu horniny, **jílové minerály** – tvoří tenký povlak na klastech, místy vyplňují prostory mezi klasty, **sericit v K-živcích**.

**Organická hmota:** místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru, hlavně v povrchové vrstvě.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, častěji izolované než propojené, dosahují velikosti do 0,1 mm, těsně u horninového povrchu jsou vyplněné křemitým tmelem (druhotná silicifikace), oxyhydroxidy Fe a rozptýlenou org. hmotou. Výjimečně se vyskytují intraklastické póry (v K-živcích). Časté jsou mikrotrhliny v křemenných klastech, hlavně u povrchu horniny. V povrchové vrstvě se vyskytují také průběžné exfoliační trhliny.



**Obr. III-5.** Střídání jemnozrnnějších (vpravo) a hrubozrnnějších (vlevo) klastů křemene vzorku KS/IV/1. Il nikoly, zvětšeno 25 × (foto L. Melounová).



**Obr. III-6.** Střídání jemnozrnnějších (vpravo) a hrubozrnnějších (vlevo) klastů křemene vzorku KS/IV/1. × nikoly, zvětšeno 25 × (foto L. Melounová).

### KS/IV/2

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 97 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytríděné, převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost klastů je 0,1 až 1 mm, průměrně kolem 0,2 mm.

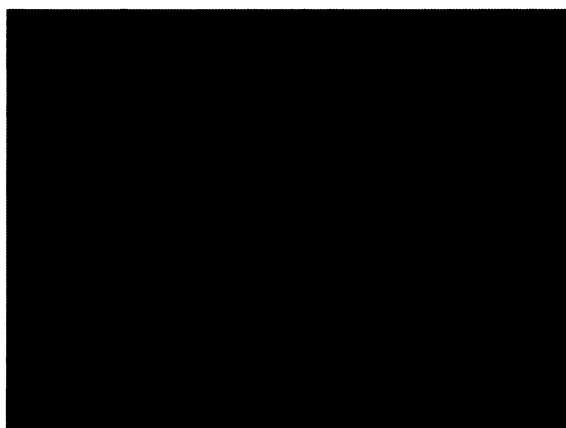
**Vedlejší klastické minerály:** **K-živec** – asi 5 obj. % klastů, velikost kolem 0,1 mm, většinou sericitizovaný.

**Akcesorie:** **turmalín**, **muskovit** – drobné šupinky, **biotit** - drobné sloupečky.

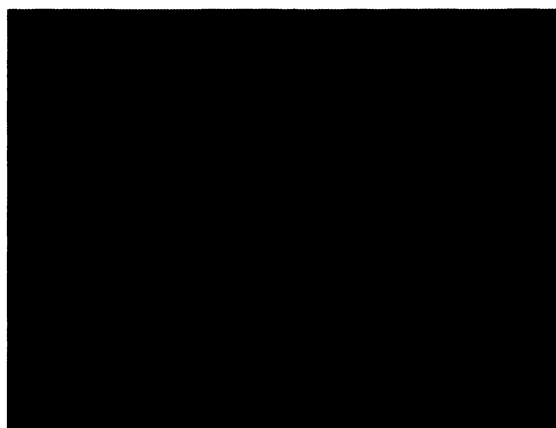
**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – většinou vyplňuje pórový prostor, povlak většiny klastů (Obr. III-7, III-8), **jílové minerály** – tvoří tenký povlak na klastech, místy vyplňují prostory mezi klasty, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** rozptýlená v pórovém prostoru, nejvíce v povrchové vrstvě.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, mírně převažují izolované, místy propojené, dosahují velikosti až kolem 0,1 – 0,2 mm. Povrchová vrstva vyplněna křemitým tmelem (druhotná silicifikace) a oxyhydroxidy Fe. Místy se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). V povrchové vrstvě se vyskytují průběžné exfoliační trhliny.



**Obr. III-7.** Povrchová vrstva (horní část snímku) vzorku KS/IV/2. Pórový prostor je částečně vyplněn organickou hmotou, oxyhydroxidy Fe a jílovými minerály. Il nikoly, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).



**Obr. III-8.** Oxyhydroxidy Fe vyplňující prostor mezi klasty vzorku KS/IV/2. Il nikoly, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).

### KS/IV/3

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – cca 95 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytríděné, převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost klastů se pohybuje mezi 0,1 – 0,8 mm, průměrně 0,2 mm. Některá zrna jsou rozpukaná.

**Vedlejší klastické minerály:** **K-živce** – 5 - 6 obj. % klastů, drobné šupinky až klasty o velikosti do 0,6 mm, většinou sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky do 0,1 mm, **turmalín**, sloupečkovitý **biotit**.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** a místy i **jílové minerály** – hlavně na povrch u zrn i v prostoru mezi zrny, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, jen místy izolované, většinou dosahují velikosti do 0,3 mm, u povrchové vrstvy se výrazně zmenšují, jsou vyplněny křemítem (silicifikace) a oxyhydroxidy Fe. Uvnitř některých křemenných klastů jsou tenké mikrotrhliny, na povrchu jsou pozorovatelné exfoliační trhliny rovnoběžné s povrchovou vrstvou. Místy se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích).

### KS/IV/4-1

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – cca 96 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, jen místy až semioválné, špatně zrnitostně vytríděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost klastů se pohybuje mezi 0,05 – 1,6 mm, průměrně 0,3 mm. Některá zrna, zvláště u povrchu, jsou rozpukaná.

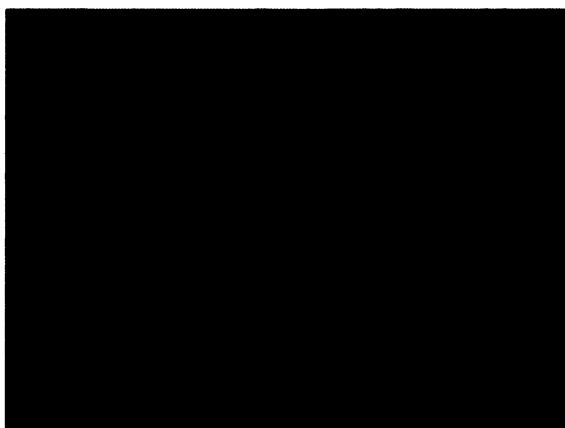
**Vedlejší klastické minerály:** **K-živce** – cca 6 obj. % klastů, velikost mezi 0,1 až 0,5 mm, rozpukaný, většinou sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín**.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tvoří povlak zrn, místy vyplňují pórový prostor, **jílové minerály** – tvoří povlak některých klastů, místy i vyplňují póry, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** hlavně v povrchové vrstvě, místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, ale i izolované, dosahují velikosti do 0,2 mm, u povrchové vrstvy se zmenšují, jsou vyplněné křemítem a oxyhydroxidy Fe (Obr. III-9, III-10). Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Uvnitř některých klastů křemene jsou tenké mikrotrhliny.



**Obr. III-9.** Povrchová vrstva (dolní část snímku) vzorku KS/IV/4-1. Pórový prostor je částečně vyplněn oxyhydroxidy Fe a křemítem tmelem. Rovnoběžné s povrchem jsou patrné průběžné exfoliační trhliny, II nikoly, zvětšeno 100 × (foto L. Melounová).



**Obr. III-10.** Pórový prostor v povrchové vrstvě vzorku KS/IV/4-1 je vyplněn druhotnou silicifikací (křemítem tmelem s oxyhydroxidy Fe, II nikoly, zvětšeno 100 × (foto L. Melounová).

#### KS/IV/5

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, místy až oválné, špatně zrnitostně vytríděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,05 – 1,6 mm, průměrně 0,3 mm. Některá zrna jsou rozpukaná.

Vedlejší klastické minerály: **K-živce** – 3 - 4 obj. % klastů, velikost až 1,5 mm, rozpukaný, většinou sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – protáhlé šupinky, **turmalín**, **biotit** – drobné sloupečky.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – místy vyplňují prostor mezi zrny, hlavně u povrchové vrstvy, tvoří povlak většiny klastů, **jílové minerály** – tvoří povlak některých klastů, místy i výplň pórů, **sericit v K-živcích**.

Organická hmota: hlavně v povrchové vrstvě, místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, ale i izolované, dosahují velikosti až do 0,4 mm, u povrchové vrstvy jsou vyplněny křemítem tmelem a těsně u povrchu organickou hmotou a prachem. Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Uvnitř klastů křemene jsou časté mikrotrhliny.

#### KS/V/1

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 95 obj. % klastů. Klasty jsou většinou subangulární, místy semioválné, špatně zrnitostně vytríděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,1 – 2,5 mm, průměrně kolem 0,5 mm. Zrna jsou místy rozpukaná.

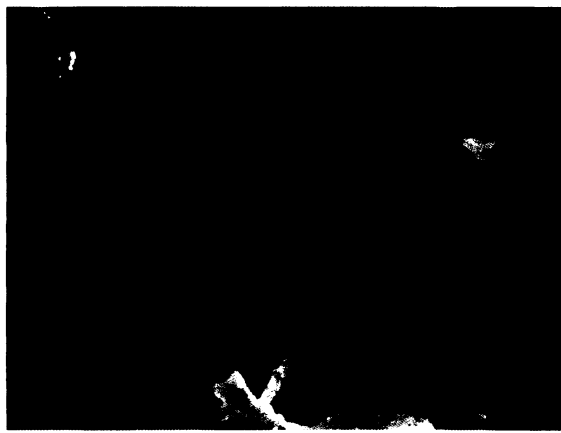
Vedlejší klastické minerály: **K-živce** – 4 - 5 obj. % klastů, velikost výjimečně až 0,8 mm, rozpukaný (obr. III-11), místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky až do velikosti 0,2 mm, **biotit** – drobné sloupečky do 0,2 mm.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – pouze v tenké povrchové vrstvě na povrchu klastů i mezi póry, **jílové minerály** – výjimečně tvoří tenký povlak na klastech, **sericit v K-živcích**.

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, ale i izolované, dosahují velikosti až do 0,5 mm, u povrchové vrstvy jsou místy vyplněny křemítem tmelem a těsně u povrchu organickou hmotou a prachem. Výjimečně se v K-živcích vyskytují i póry intraklastické. Uvnitř klastů křemene jsou časté všesměrné mikrotrhliny.



**Obr. III-11.** Klast K-živce a klasty křemene vzorku KS/V/1. Hojný pórový prostor je zvýrazněn fluorescencí v ultrafialovém světle, zvětšeno 50 × (foto L. Melounová).



#### KS/V/2

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 95 obj. % klastů. Klasty jsou většinou subangulární, místy angulární, některé i semioválné, špatně zrnitostně vytríděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,1 – 1 mm. Ve výbrusu jsou pozorovatelné 2 polohy: jemnozrnější s klasty do velikosti 0,2 mm, hrubozrnější s klasty až do velikosti 0,5 – 1 mm. Zrna jsou místy rozpukaná.

**Vedlejší klastické minerály:** **K-živec** – 4 - 5 obj. % klastů, velikost výjimečně až 0,6 mm, silně rozpukáný, místy sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín**.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak klastů nebo jemně rozptýlené mezi klasty, místy tenký povlak **jílových minerálů** na klastech, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** místy, hlavně u povrchu, jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, mezi drobnějšími klasty jen částečně propojené nebo izolované, dosahují velikosti výjimečně až do 0,6 mm. Časté jsou mikrotrhliny uvnitř křemenných klastů.

#### KS/V/3

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytríděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,05 – 2,2 mm, nejčastěji mezi 0,2 – 0,3 mm. Zrna jsou silně rozpukaná.

**Vedlejší klastické minerály:** **K-živec** – 3 - 4 obj. % klastů, velikost až 0,2 mm, silně rozpukáný, místy sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín**.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak klastů nebo jemně rozptýlené v pórovém prostoru, **jílové minerály** – jen místy tvoří povlak klastů, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy částečně propojené nebo izolované, dosahují velikosti až 0,3 mm. Jen výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Časté jsou mikrotrhliny uvnitř klastů křemene a průběžné exfoliační trhliny v povrchové vrstvě.

#### KS/V/4

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou většinou subangulární, místy angulární (Obr. III-12), některé i semioválné, špatně zrnitostně vytríděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,05 – 3 mm, průměrně kolem 0,4 mm. Zrna jsou silně rozpukaná.

**Vedlejší klastické minerály:** **K-živec** – 3 - 4 obj. % klastů, velikost až 0,8 mm, rozpukáný, místy sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín**.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak na povrchu klastů, na horninovém povrchu vyplňují místy i póry, **jílové minerály** – jen výjimečně tvoří povlak na povrchu klastů, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné (Obr. III-12), interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy i izolované, dosahují výjimečně velikosti až 0,6 mm. V povrchové vrstvě jsou póry více izolované, vyplněné oxyhydroxidy Fe. Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Časté jsou mikrotrhliny uvnitř křemenných klastů a průběžné exfoliační trhliny v povrchové vrstvě (Obr. III-13).



**Obr. III-12.** Na snímku je patrná převaha křemenných klastů a jejich nedokonalá opracovanost. I bez zvýraznění fluorescencí je viditelný hojný pórový prostor a částečná propojenost pórů, II nikoly, zvětšeno 25 × (foto L. Melounová).



**Obr. III-13.** Exfoliační trhliny v povrchové vrstvě vzorku KS/V/4 zvýrazněné fluorescencí v ultrafialovém světle, zvětšeno 100 × (foto L. Melounová).

#### KS/VI/1

**Hlavní klastické minerály:** **křemen** – asi 96 obj. % klastů. Klasty jsou většinou angulární, špatně zrnitostně vytříděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,1– 1 mm, průměrně kolem 0,4 mm. Zrna jsou silně všesměrně rozpukaná.

**Vedlejší klastické minerály:** **K-živce** – 3 - 4 obj. % klastů, velikost až 0,8 mm, rozpukaný, místy sericitizovaný.

**Akcesorie:** **muskovit** – drobné šupinky, **turmalín**.

**Sekundární minerály:** **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak na povrchu klastů, **jílové minerály** – jen výjimečně tvoří tenký povlak na povrchu klastů, **sericit** v K-živcích.

**Organická hmota:** místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

**Pórový prostor:** Póry jsou hojné (Obr. III-14), interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy i izolované, dosahují výjimečně velikosti až 0,5 mm. Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Časté jsou mikrotrhliny uvnitř klastů křemene (Obr. III-14), hlavně u povrchu horniny.



**Obr. III-14.** Hojný pórový prostor zvýrazněný fluorescencí v ultrafialovém světle u vzorku KS/VI/1, patrné jsou také intraklastické trhliny v klastech křemene, zvětšeno 100 × (foto L. Melounová).

### KS/VI/2

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 95 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytříděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,05 – 3 mm, průměrně 0,3 - 0,4 mm. Zrna jsou silně všesměrně rozpukaná.

Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – asi 4 obj. % klastů, velikost do 0,2 mm, rozpukáný, místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky do velikosti 0,1 mm.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – velmi tenký tenký povlak na povrchu klastů, **jílové minerály** – jen výjimečně tvoří tenký povlak na povrchu klastů, **sericit v K-živcích**.

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy i izolované, dosahují výjimečně velikosti až 0,5 mm. Časté jsou mikrotrhliny uvnitř klastů křemene, hlavně u povrchu horniny.

### KS/VI/3

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 97 obj. % klastů. Klasty jsou většinou subangulární, špatně zrnitostně vytříděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,1 – 1,2 mm, průměrně kolem 0,4 mm. Zrna jsou všesměrně rozpukaná.

Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – asi 2-3 obj. % klastů, velikost do 0,2 mm, místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky, **biotit** – drobné sloupečky, **turmalín**.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – povlak na povrchu klastů, hlavně u povrchu horniny vyplňují pórový prostor (Obr. III-15), **jílové minerály** – místy tvoří tenký povlak na povrchu klastů, **sericit v K-živcích**.

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy i izolované, dosahují velikosti až 0,4 mm. Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Časté jsou mikrotrhliny uvnitř klastů křemene a průběžné exfoliační trhliny v povrchové vrstvě.



**Obr. III-15.** Hojný pórový prostor zvýrazněný fluorescencí v ultrafialovém světle je u vzorku KS/VI/3 je v povrchové vrstvě (horní část snímku) vyplněn oxyhydroxidy Fe. Zvětšeno 25 × (foto L. Melounová).

### KS/VI/4

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 97 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, některé až oválné, špatně zrnitostně vytříděné. Převažuje monokrystalický křemen nad

polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost klastů se pohybuje mezi 0,05 – 1 mm, průměrně 0,4 mm. Zrna jsou silně rozpukaná.

Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – asi 2 obj. % klastů, velikost až 0,2 mm, silně rozpukaný, místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – velmi drobné šupinky, **turmalín, biotit**.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – tenký povlak klastů, u povrchu vyplňují pórový prostor, **jílové minerály** – místy tvoří tenký povlak na povrchu klastů, **sericit v K-živcích**

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru, hlavně u povrchu horniny.

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené (Obr. III-16), místy částečně propojené výjimečně zcela izolované, dosahují velikosti až 0,3 mm. Hlavně u povrchu vyplněné Fe oxyhydroxidy a křemitým tmelem. Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích). Časté jsou mikrotrhliny uvnitř klastů křemene.



**Obr. III-16.** Hojný pórový prostor zvýrazněný fluorescencí v ultrafialovém světle je u vzorku KS/VI/4. Na snímku je dobře patrná propojenost pórů a nevytříděnost křemenných klastů. Zvětšeno 25 × (foto L. Melounová).

#### KS/VI/5

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 97 obj. % klastů. Klasty jsou angulární až subangulární, středně až špatně zrnitostně vytříděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost klastů se pohybuje mezi 0,05 – 0,6 mm, průměrně 0,2 mm.

Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – asi 2 obj. % klastů, velikost až 0,2 mm, silně rozpukaný, místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky do velikosti 0,2 mm, **turmalín**.

Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – povlak klastů, místy rozptýlené v pórovém prostoru, **jílové minerály** – místy tvoří tenký povlak na povrchu klastů, **sericit v K-živcích**.

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru

Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy částečně propojené, dosahují velikosti až 0,2 mm. U povrchu vyplněné oxyhydroxidy a křemitým tmelem.

#### KS/VII/1

Hlavní klastické minerály: **křemen** – asi 95 obj. % klastů. Klasty jsou většinou angulární až subangulární, špatně zrnitostně vytříděné. Převažuje monokrystalický křemen nad polykrystalickým, asi 1/3 zrn zháší undulózně. Velikost se pohybuje mezi 0,05 – 0,8 mm, průměrně mezi 0,0 – 0,2 mm.

Vedlejší klastické minerály: **K-živec** – asi 5 obj. % klastů, velikost kolem 0,1 mm, místy sericitizovaný.

Akcesorie: **muskovit** – drobné šupinky do 0,1 mm, **turmalín**.

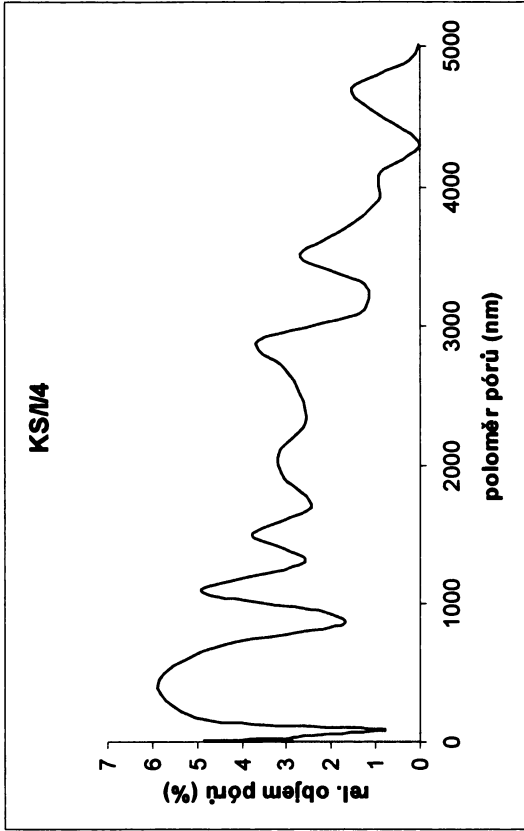
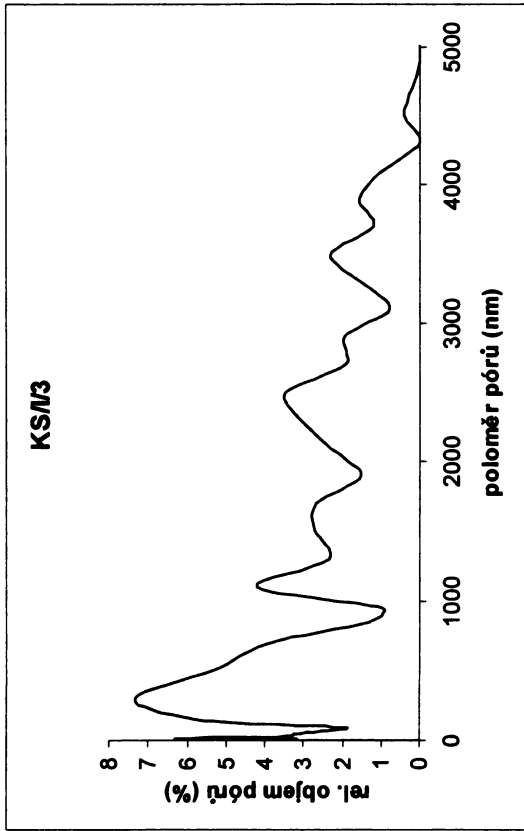
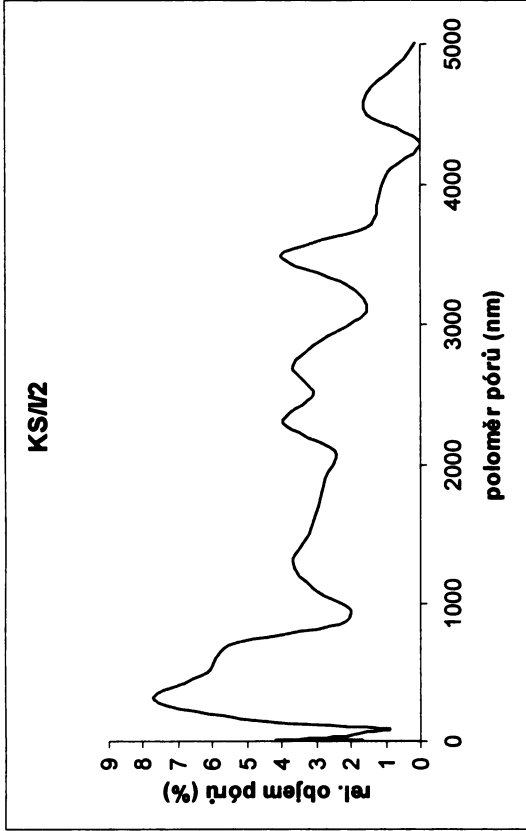
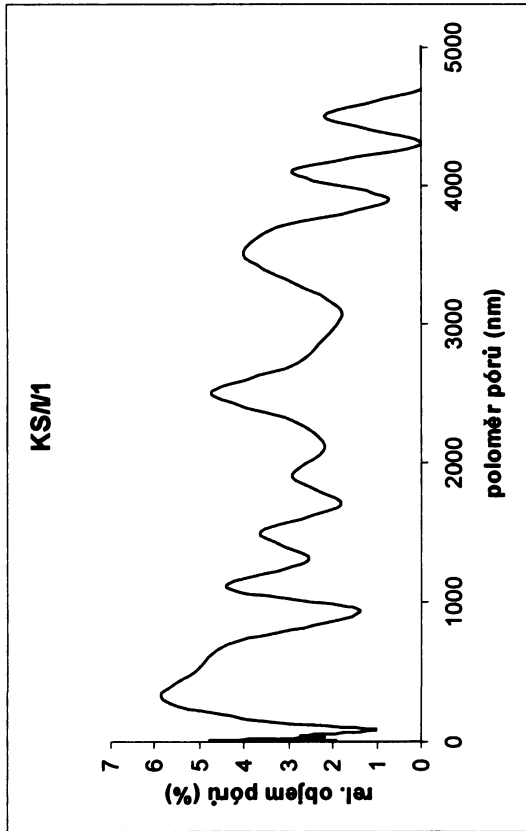
Sekundární minerály: **oxyhydroxidy Fe** – povlak na povrchu klastů nebo rozptýlené v pórovém prostoru, **sericit** v K-živcích.

Organická hmota: místy jemně rozptýlená v pórovém prostoru.

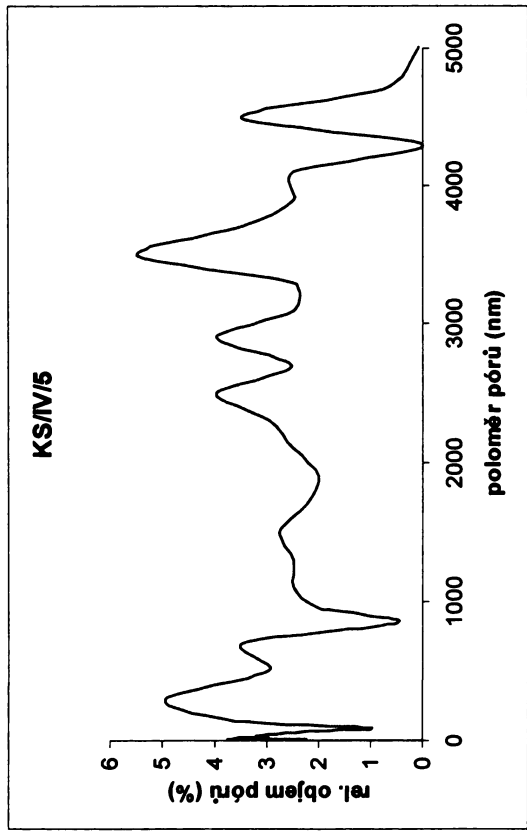
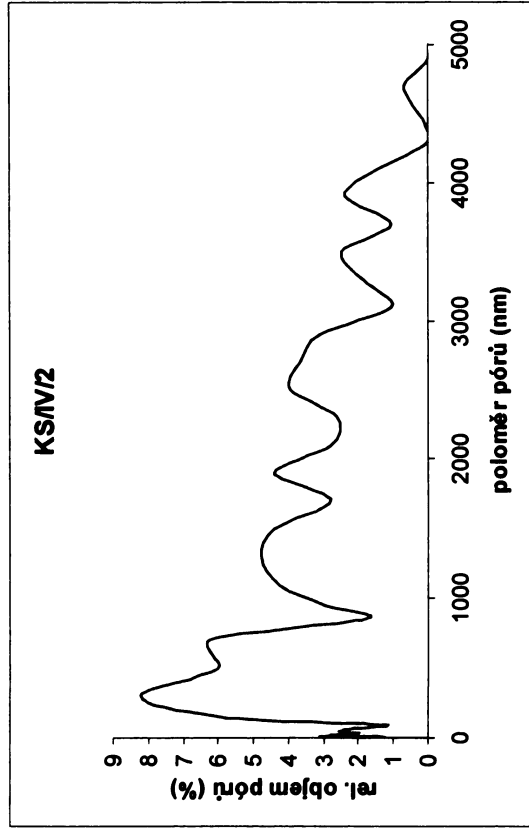
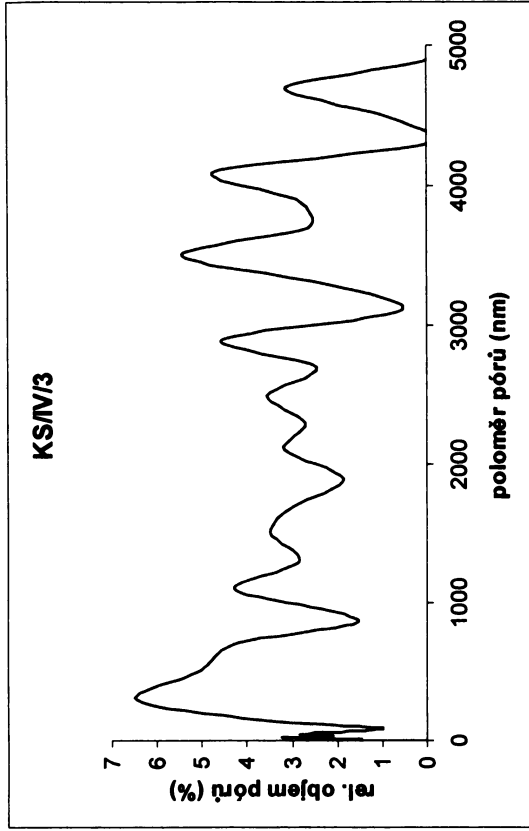
Pórový prostor: Póry jsou hojné, interklastické, nepravidelného tvaru, většinou propojené, místy i izolované, dosahují velikosti až 0,2 mm. Výjimečně se vyskytují i póry intraklastické (v K-živcích).

**PŘÍLOHA IV:**

**Grafy velikostního zastoupení pórů určeného metodou vysokotlaké  
Hg porozimetrie**

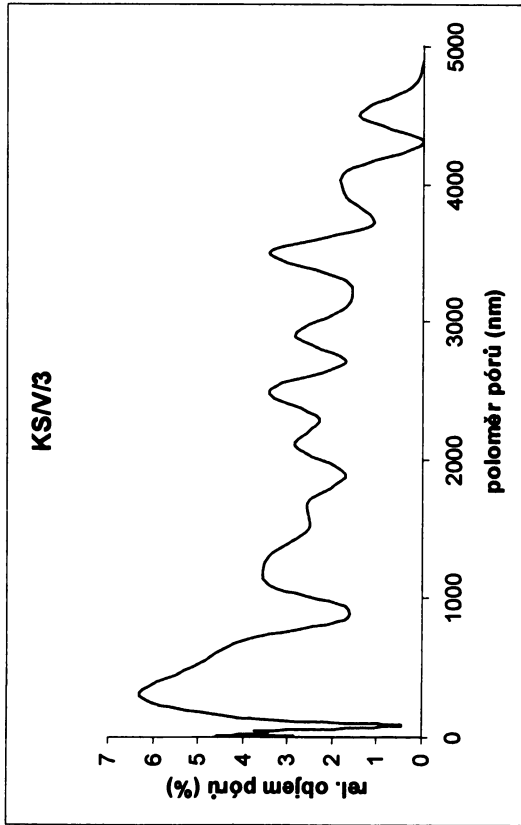
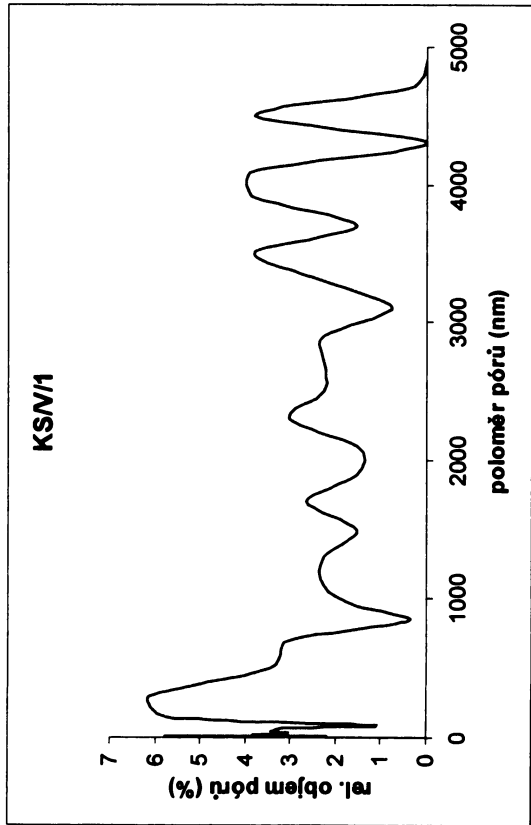
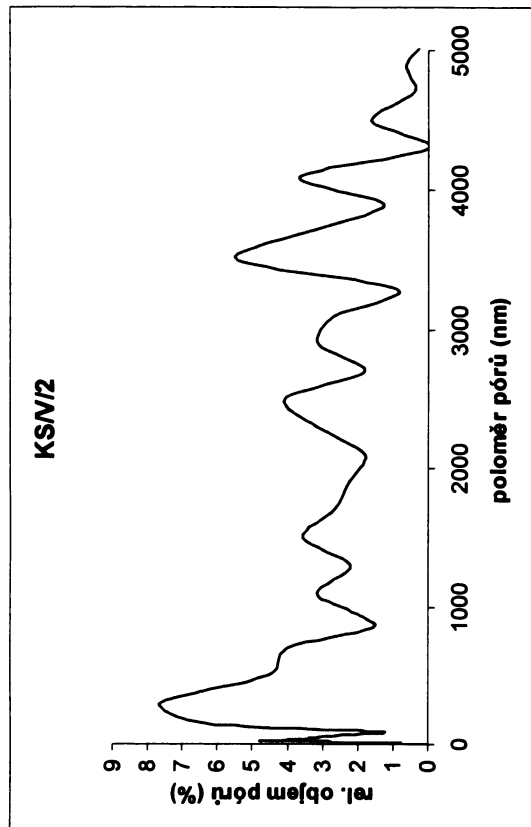


Obr. I-1. Grafy velikostní distribuce pórů ve vzorcích ze severního defilé Křídelní stěny (KS/I/1, KS/I/2, KS/I/3, KS/I/4).

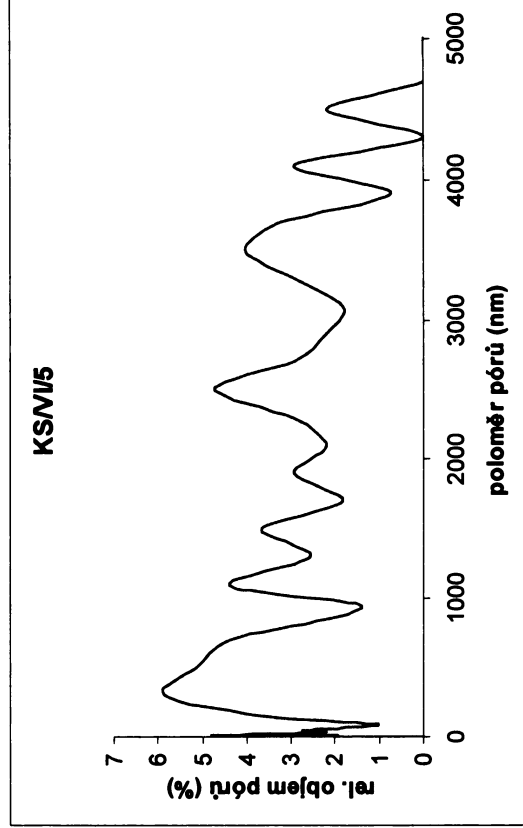
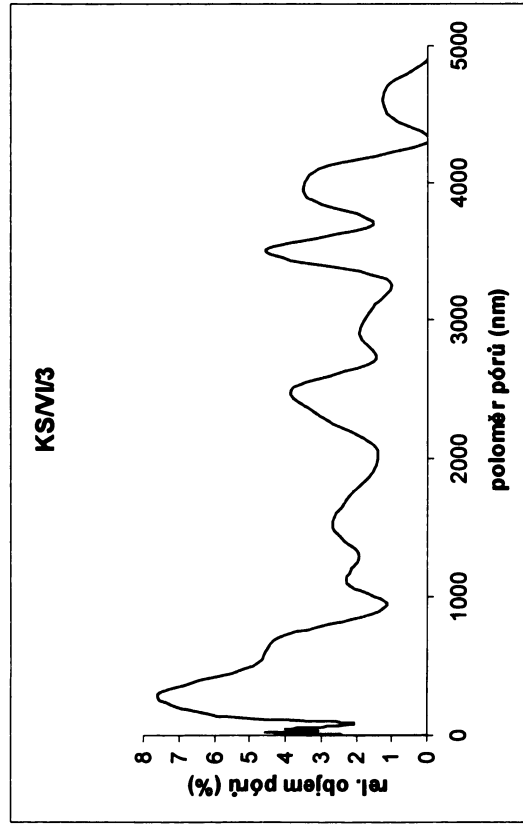
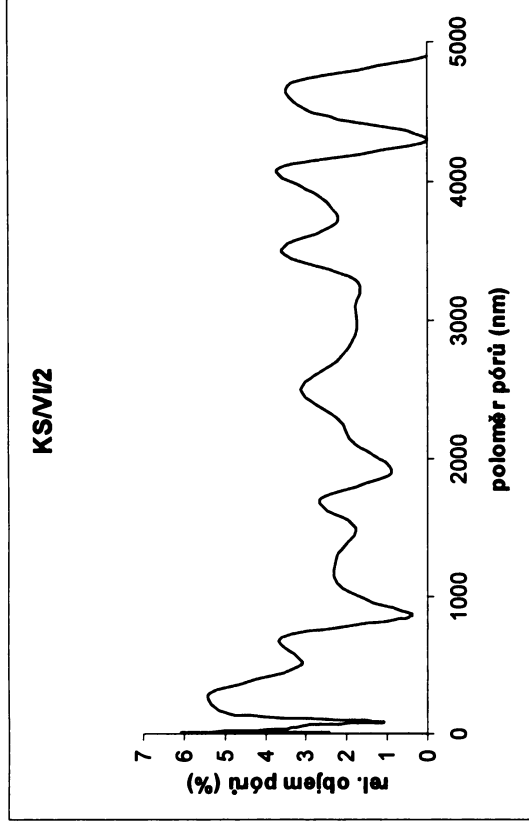
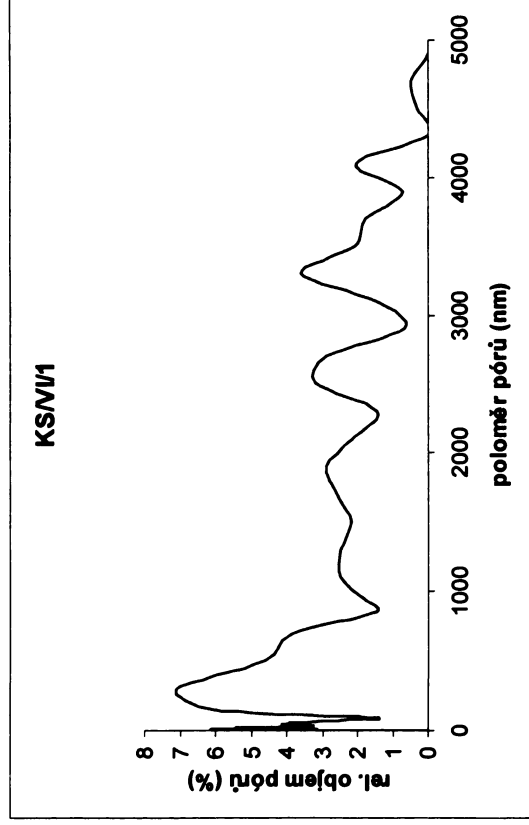


Obr. I-2. Grafy velikostní distribuce pórů ve vzorcích z jižního defilé Křídelní stěny (KS/IV/2, KS/IV/3, KS/IV/5).





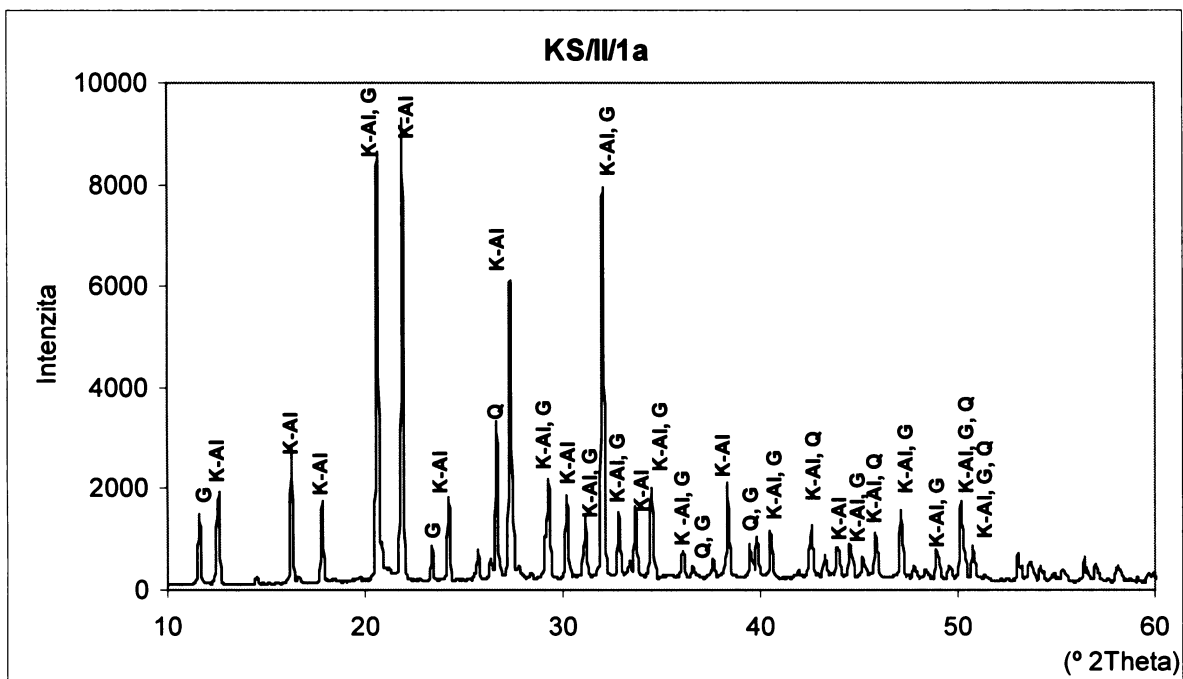
Obr. I-3. Grafy velikostní distribuce pórů ve vzorcích z východního děle Křídelní stěny (KSN/1, KSN/2, KSN/3).



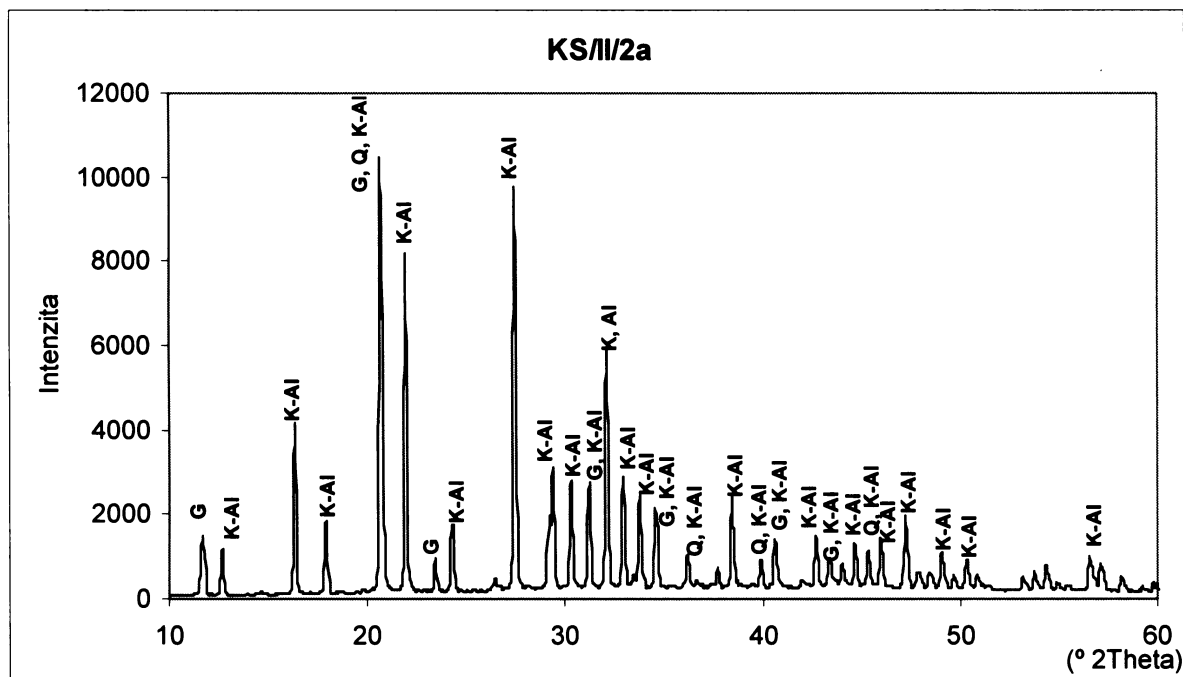
Obr. I-4. Grafy velikostní distribuce pórů ve vzorcích ze západního defilé Křídelní stěny (KSMI/1, KSMI/2, KSMI/3, KSMI/5).

## **PŘÍLOHA V:**

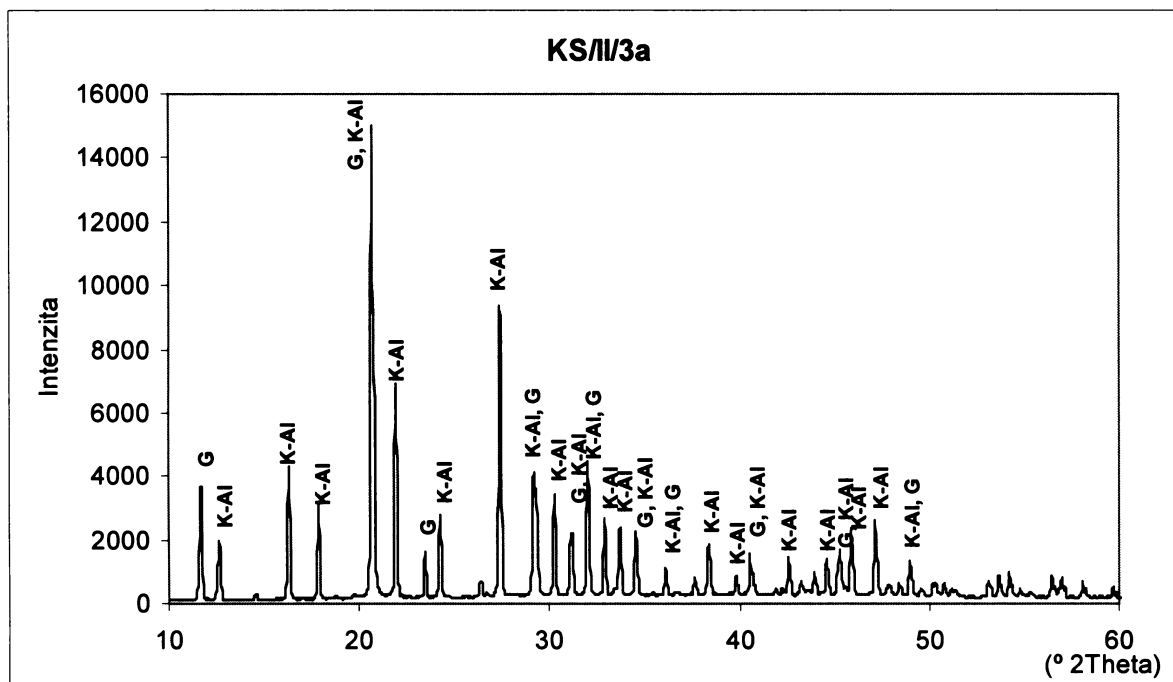
**Grafické znázornění difraktogramů solných krust**



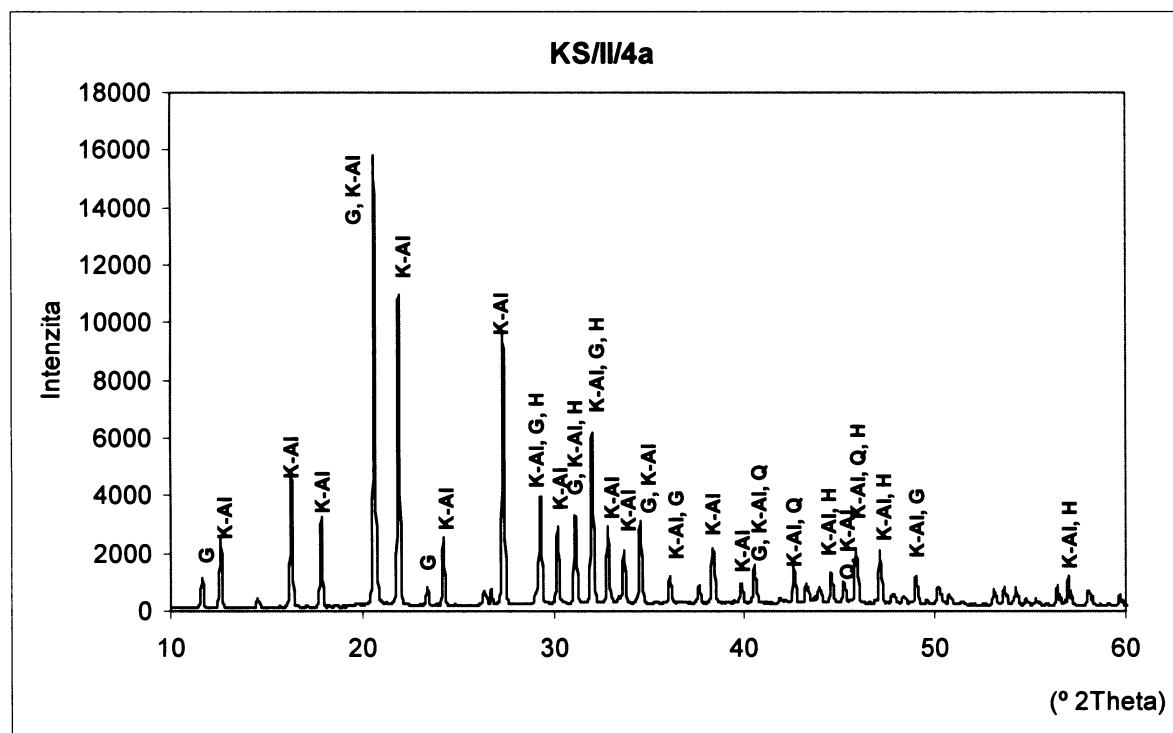
**Obr. V-1.** Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/II/1a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen.



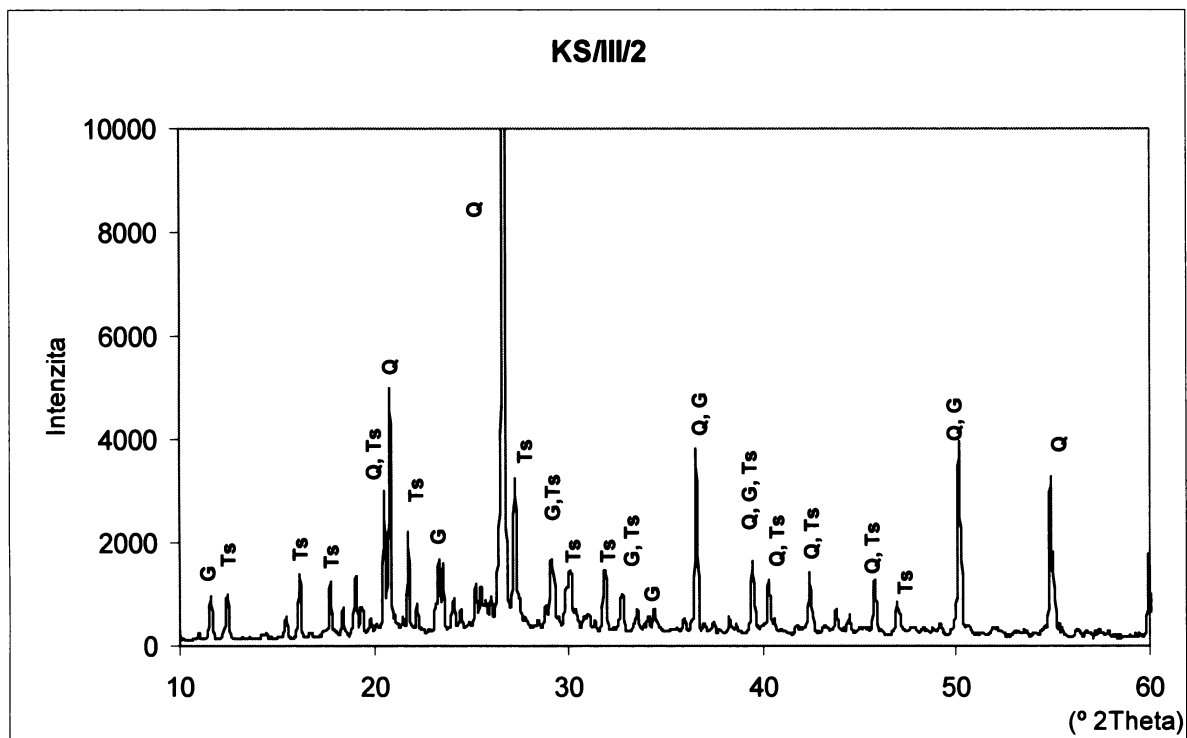
**Obr. V-2.** Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/II/2a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen.



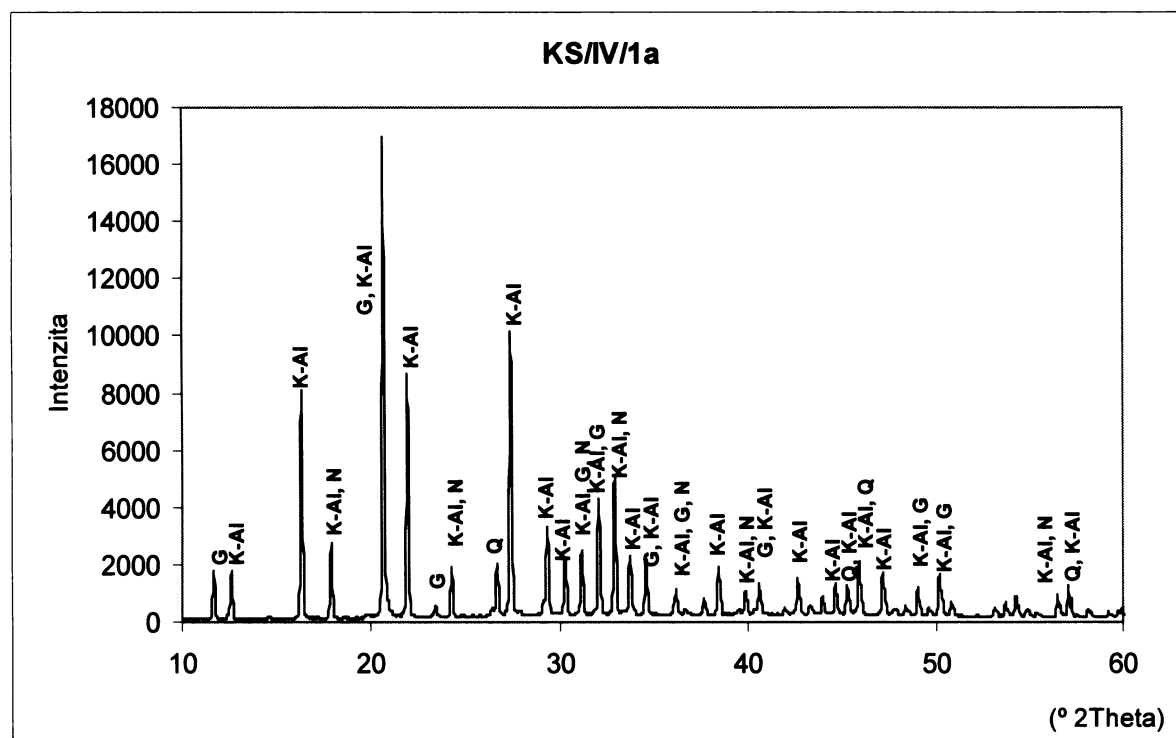
**Obr. V-3.** Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/II/3a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .



**Obr. V-4.** Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/II/4a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen, H – hydrofilit.

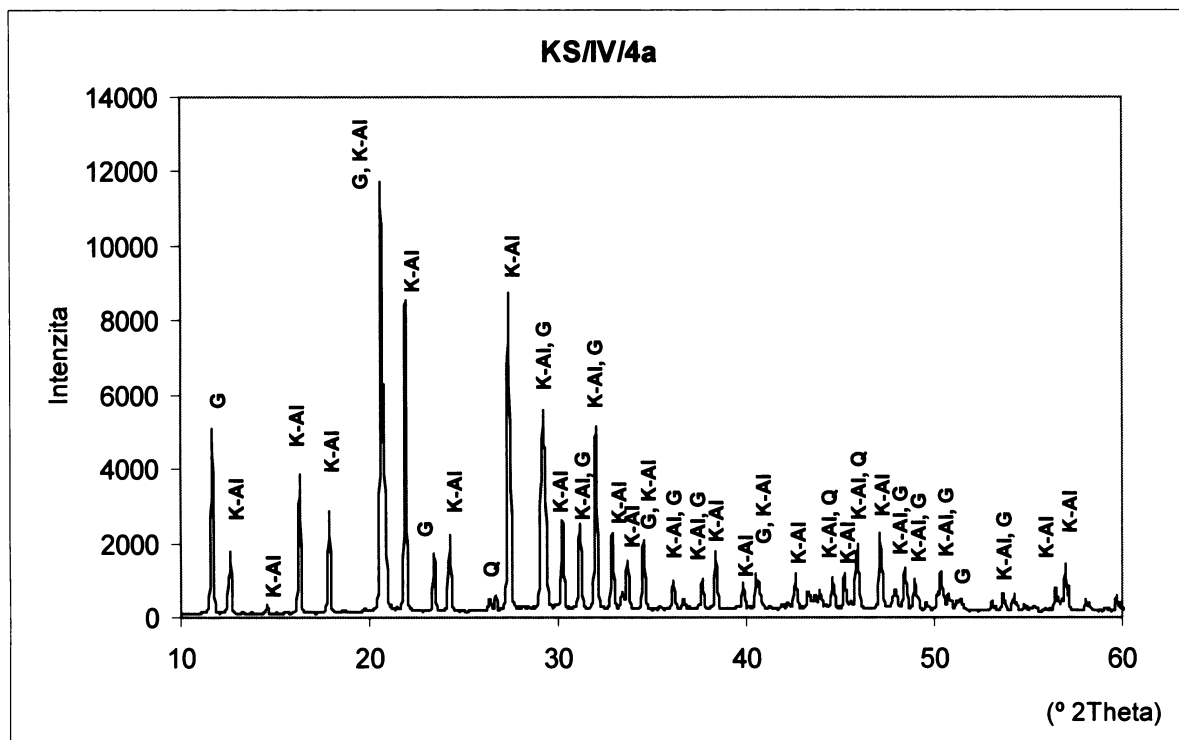


Obr. V-5. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/III/2. G = sádrovec, Ts = čermíkit, Q = křemen, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , N – nitramit.

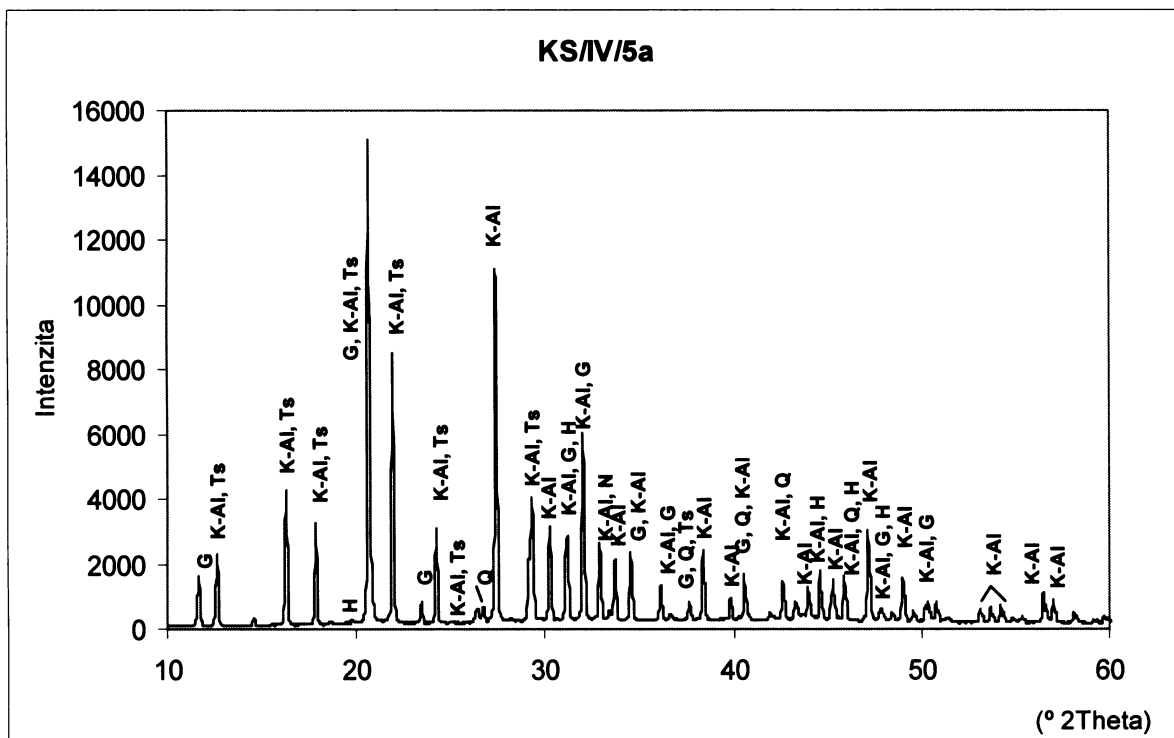


Obr. V-6. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/IV/1a. K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , G = sádrovec, Q = křemen, N = nitramit.





Obr. V-9. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/IV/4a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen.

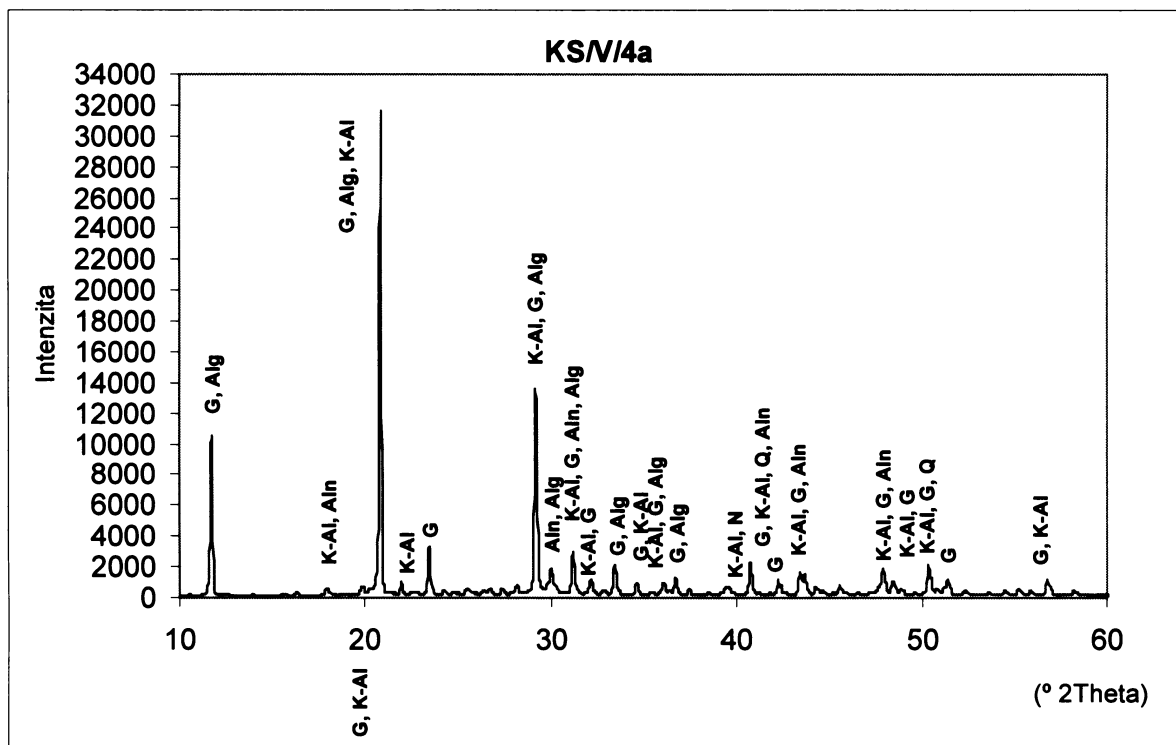


Obr. V-10. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/IV/5a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen, Ts = čermíkít.

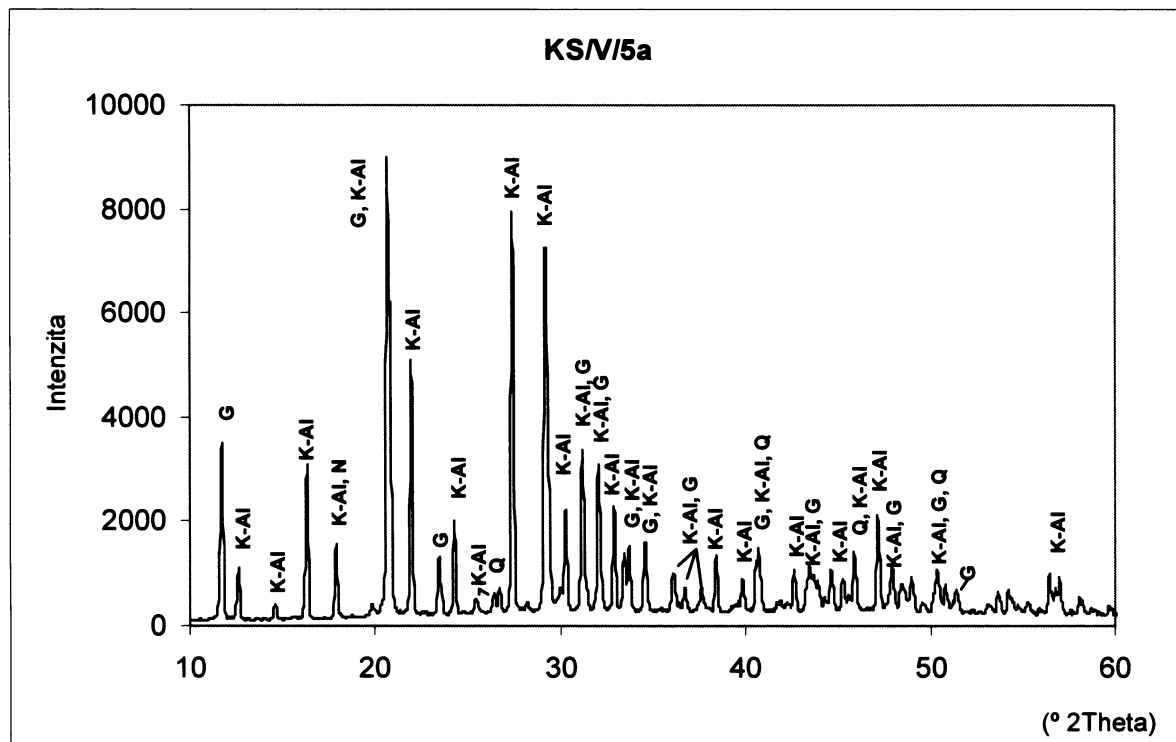






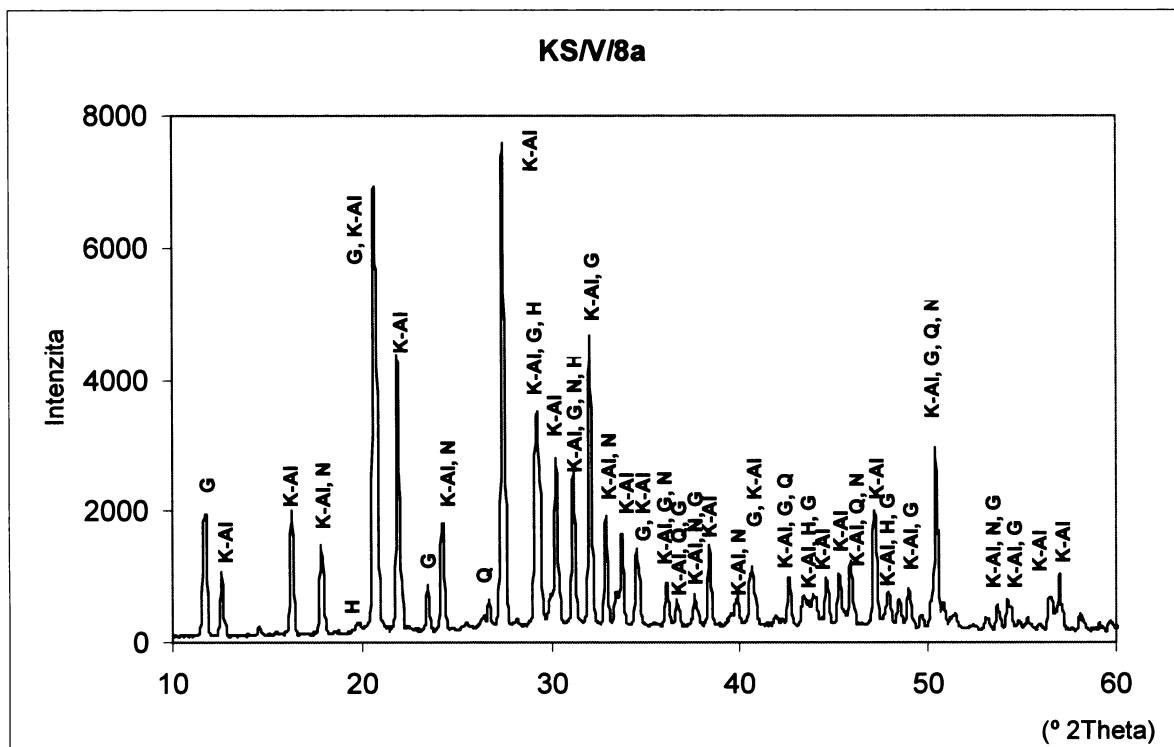


Obr. V-15. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/V/4a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Aln = alunit, Alg = alunogen, Q = křemen.

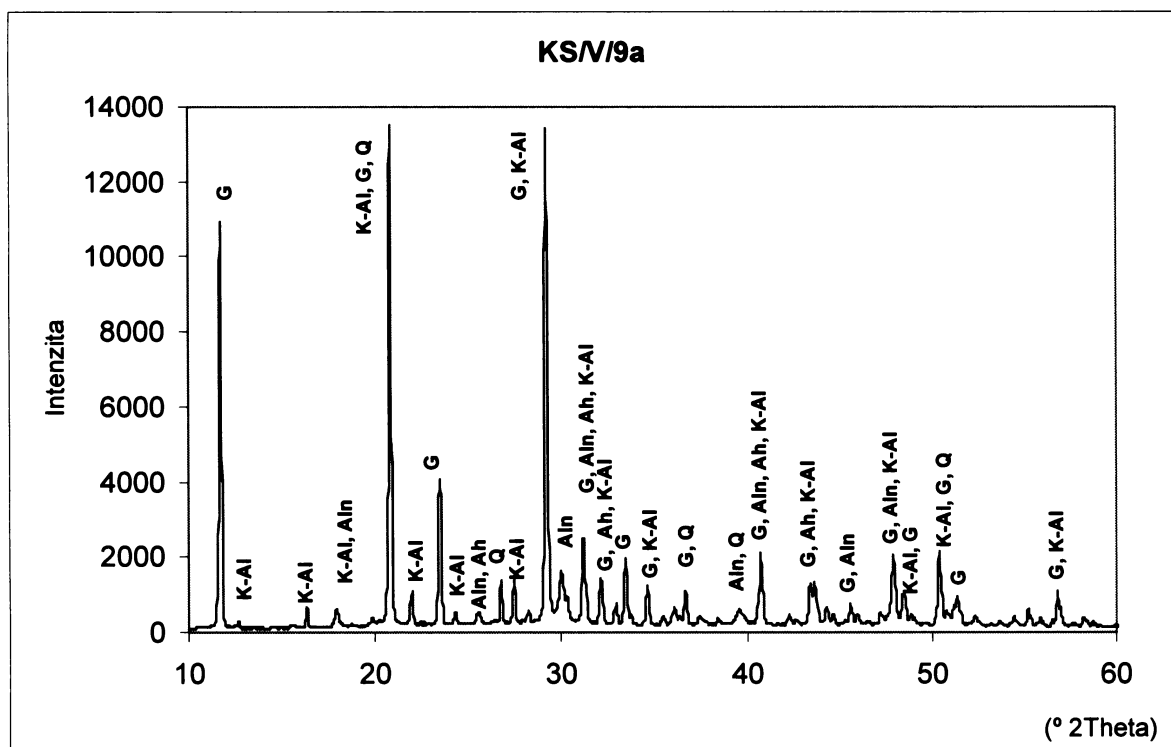


Obr. V-16. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/V/5a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen.

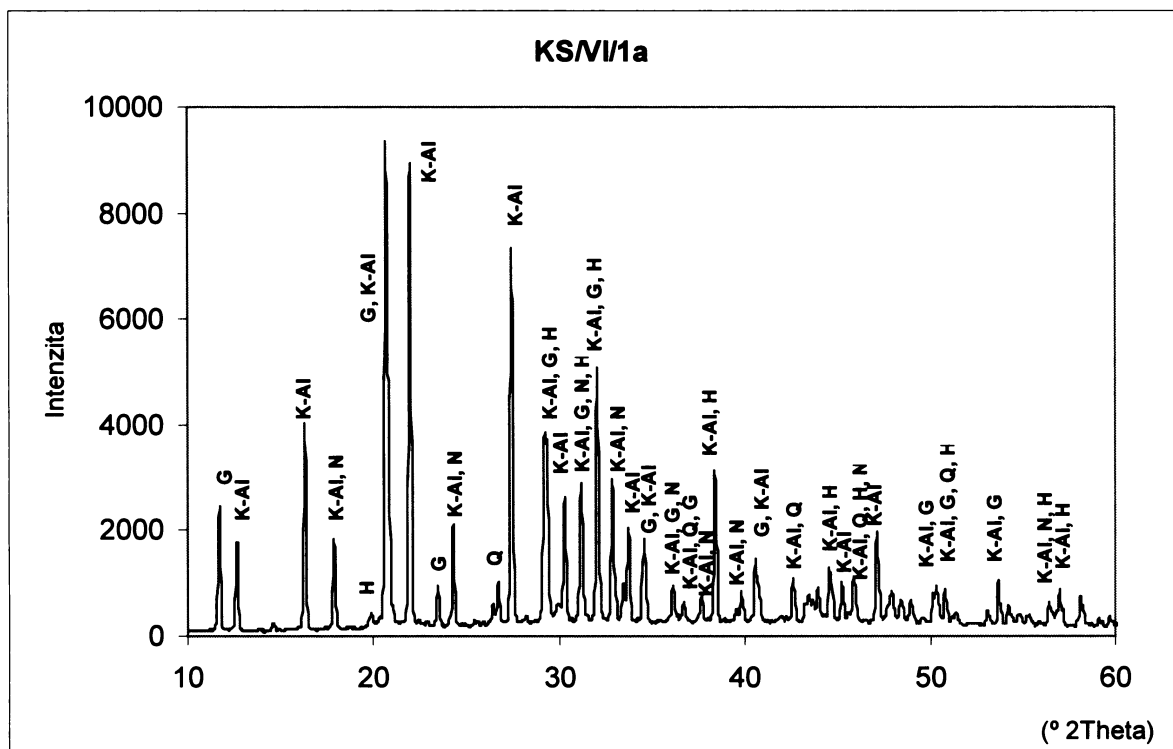




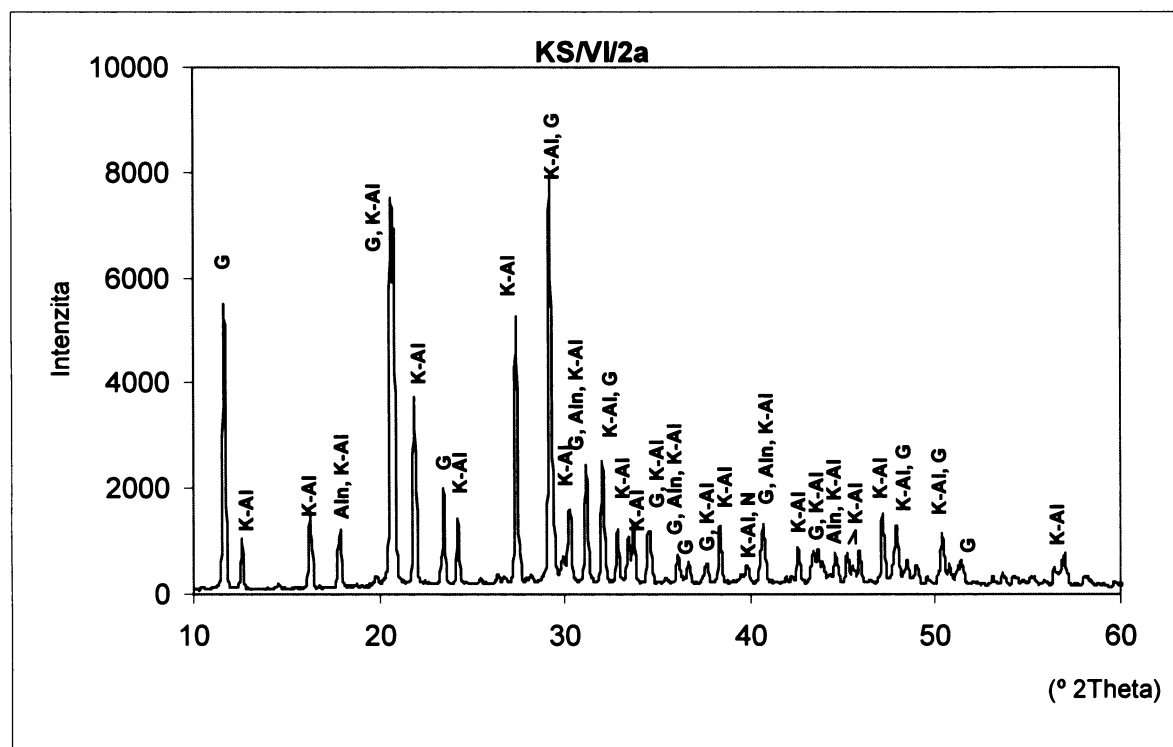
Obr. V-19. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/V/8a. G = sádrovec, K-Al =  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ , Q = křemen, N = nitramit, H = hydrofilit.



Obr. V-20. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/V/9a. G = sádrovec, K-Al =  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ , Q = křemen, Aln = alunit, Ah = anhydrit.



Obr. V-21. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/VI/1a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Q = křemen, H = hydrofilit, N = nitramit.



Obr. V-22. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/VI/2a. G = sádrovec, K-Al =  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , Aln = alunit.

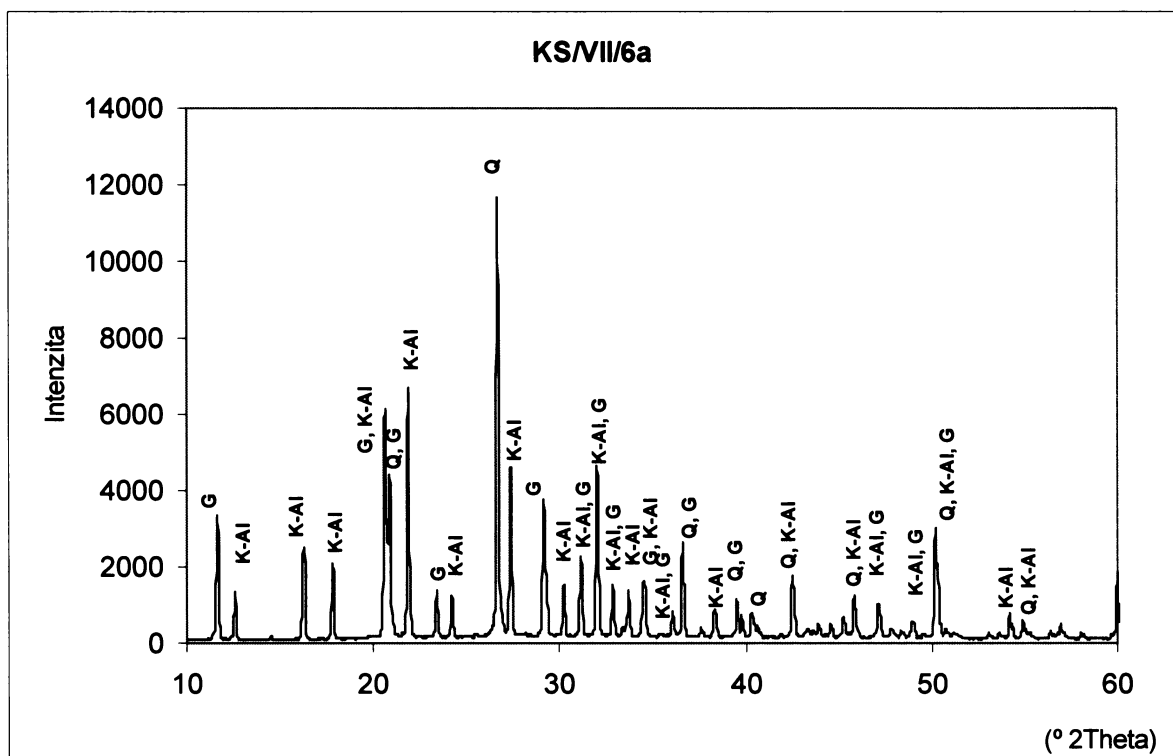












Obr. V-31. Grafické znázornění difraktogramu vzorku KS/VII/6a. G = sádrovec, K-Al =  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ , Q = křemen.

