

Zpracování vzorků z korozních experimentů – Korozní produkty 2

Autoři: Jan Stoulil a kol.

Praha, 2023

NÁZEV ZPRÁVY: Zpracování vzorků z korozních experimentů – Korozní produkty 2

NÁZEV PROJEKTU: Zpracování vzorků z korozních experimentů – Korozní produkty 2

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU: Závěrečná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO2023-002

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Stoulil J.¹, Mukhtar S.¹, Lhotka M.¹, Bureš R.¹, Kašpar V.², Šachlová Š.², Dobrev D.², Večerník P.², Zuna M.², Němeček J.³, Němeček J.³

VŠCHT Praha¹, ÚJV Řež², FSv ČVUT³

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS: Stoulil J. a kol. (2023): Zpracování vzorků z korozních experimentů – Korozní produkty 2, Technická zpráva SÚRAO TZ 700/2022.

Michaela Matulová

Manažer projektu (SÚRAO)

29.9. 2023

Jan Stoulil

Manažer projektu (VŠCHT Praha)

29.9. 2023

Obsah

1	Úvod a popis vzorků	7
2	Fázová analýza (XRD)	10
3	Mikroanalýzy	12
4	Pórovitost	25
5	Mechanické vlastnosti (nanoindentace)	27
6	Závěr	29

Seznam příloh

Příloha 1 – Surová data XRD – difraktogramy

Příloha 2 – Nanoindentace

Seznam použitých zkratk

B75	komerční označení bentonitu (Bentonit Rokle B75 – aktivovaný uhličitanem sodným)
BaM	komerční označení bentonitu (Bentonit a Montmorillonit)
BET	metoda stanovení pórovitosti pomocí Braunauer-Emmett-Tellerovy adsorpční izotermy plynu
BSE	scan odražených elektronů (metoda zobrazení SEM)
EDS	energievě disperzní rentgenová spektroskopie (prvková analýza SEM)
MaCoTe	Materials Corrosion Test (mezinárodní projekt)
SE	scan sekundárních elektronů (metoda zobrazení SEM)
SEM	scanovací elektronová mikroskopie
UOS	ukládací obalový soubor
XRD	rentgenová difrakce

Abstrakt

V rámci krátkého projektu byly hodnoceny vzorky z dlouhodobých experimentů v podzemních laboratořích (MaCoTe a MockUp) a vzorky z dolu Kiruna, kde jsou v dlouhodobém kontaktu částice železné rudy a jílu (bohatého na smektit). Vzorky byly analyzovány pomocí XRD, SEM/EDS, BET a nanoindentace. Výsledky potvrdily, že pravděpodobně není potřeba brát pro modely životnosti UOS v potaz korozní produkty na bázi (hlinito)křemičitanů železa. Dále byly stanoveny moduly pružnosti sideritu, jako hlavního korozního produktu, které jsou nepřímo úměrné mikroporovitosti.

Klíčová slova

dlouhodobé expozice, korozní produkty, mechanické vlastnosti

Abstract

Within the scope of this short project, there were evaluated samples of long-term experiments in underground labs (MaCoTe a MockUp) and also samples from Kiruna mine, where are in a long-term contact particles of iron ore and clay. Samples were evaluated by means of XRD, SEM/EDS, BET and nanoindentation. The results confirmed, there is no need to take (alumo)silicate-based corrosion products into consideration for canister lifetime models. There was estimated also elastic modulus of siderite, which is the main corrosion product, and its dependence on microporosity.

Keywords

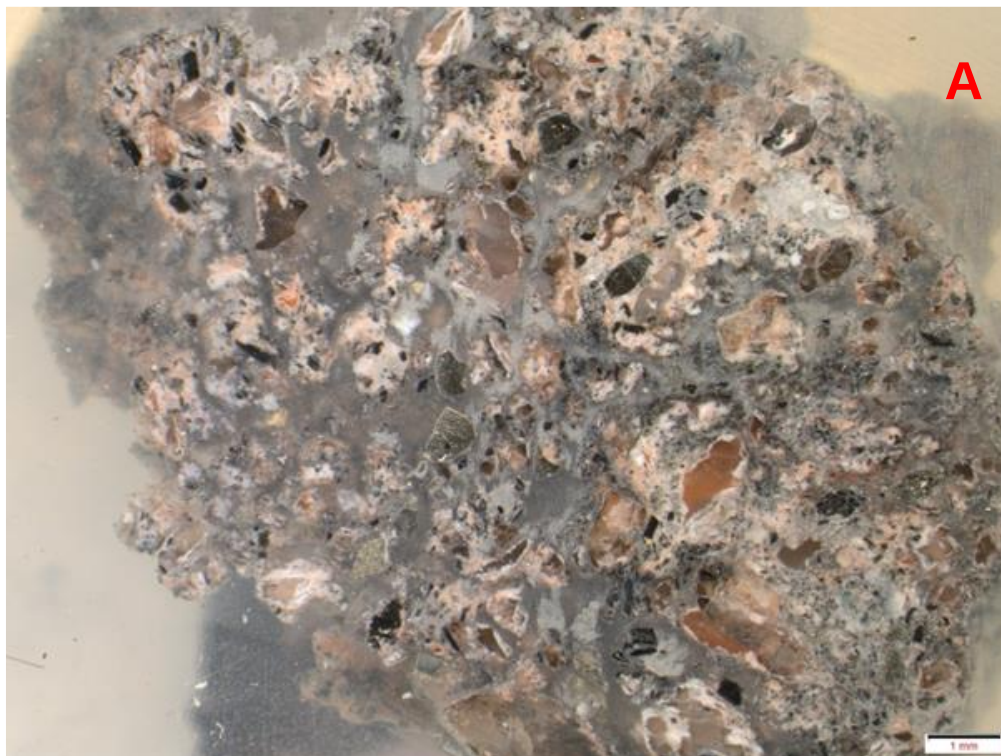
long-term exposures, corrosion products, mechanical properties

1 Úvod a popis vzorků

Předchozí projekty ukázaly jako významný faktor korozního napadení vnějšího pláště ukládacího obalového souboru (UOS) transport rozpustných korozních produktů skrz pórový systém bentonitu, utěšňovaný postupně v čase nově vznikajícími pevnými korozními produkty. Velmi významným faktorem je suchá hustota kompaktovaného bentonitu (Forman et al. 2021). Studium archeologických analogů ukázalo, jako další významný faktor, cyklické mechanické praskání vrstvy korozních produktů a ztráta jejich ochranné bariérové funkce (Stoulil et al. 2022). Pro nově vznikající modely životnosti vnějšího obalu, které budou zahrnovat výše zmíněné faktory a nově i synergické mechanické selhávání vnějšího pouzdra, dané korozním napadením a vnějším tlakem.

Pro cyklické mechanické praskání korozních produktů i nárůst vnějšího tlaku vznikem korozních produktů s vyšším objemem než původní kov, je třeba stanovit pórovitost a mechanické vlastnosti korozních produktů. V rámci tohoto krátkého projektu byly tyto charakteristiky ověřovány spolu se složením korozních produktů a zároveň byla prověřována možná alterace bentonitu kationty železa.

Pro analýzy byly k dispozici vzorky bentonitu s vrstvou korozních produktů z projektu MaCoTe (Zuna et al. 2023) po 7 letech expozice uhlíkové oceli v bentonitu BaM v podzemní laboratoři v Grimselu (Švýcarsko). Dalším byl vzorek z projektu MockUp Josef po 10 letech expozice uhlíkové oceli v bentonitu Rokle B75 v podzemní laboratoři Štola Josef. V tomto případě byly k dispozici jak vzorky bentonitu s korozními produkty, tak i samotný kov s pevně ulpělými korozními produkty. Další sadou vzorků byly vzorky z dolu Kiruna (Švédsko), které byly vyzvednuty v rámci projektu KINA (Kiruna Natural Analogue) a laskavě poskytnuty díky švýcarským kolegům z Nagra a japonským kolegům z NUMO. Jedná se o tři vzorky z různých lokalit v dole, viz Obr. 1. Všechny zahrnují směs jílu a částic železných rud, které spolu byly v hloubce okolo 1320 m v kontaktu po dobu minimálně 10^8 let. V rámci tohoto projektu jsme se nesnažili duplikovat již perfektně odvedenou mineralogickou charakterizaci vzorků z Kiruny, která již proběhla (Gilg a Andersson 2020), ale ověřit možnost přítomnosti minoritních sekundárních (hlinito)křemičitanových fází se železem, které by mohly teoreticky být finálními korozními produkty transformace (Gondolli et al. 2018).





Obr. 1 Snímky vzorků z Kiruny

2 Fázová analýza (XRD)

Vzorky byly v případě bentonitu s korozními produkty (MaCoTe a MockUp) a vzorky z Kiruny homogenizovány v třecí misce s tloučkem. Pro analýzu pomocí rentgenové difrakce (XRD) byly poté od každého vzorku použity 2 g prášku. Vzorek povrchové vrstvy na kovu s korozními produkty (MockUp) byl podroben analýze vcelku. Všechny vzorky byly analyzovány pomocí přístroje XPert Pro (PANalytical, Nizozemí). Semikvantitativní vyhodnocení obsahu jednotlivých fází bylo v takto komplikovaném systému zdrženlivé a jedná se o kvantifikaci velmi hrubě orientační. V zásadě byly vyhodnocovány 3 úrovně výskytu: stopové (na hranici detekčního limitu pod 5 obj.%), minoritní (pod 20 obj.%) a majoritní (nad 20 obj.%).

Tab. 1 sumarizuje výsledky na vzorcích MaCoTe a MockUp. Oba vzorky obsahují fáze typické pro bentonit, a to i pro vzorky ulpělé na povrchu kovu (MockUp). Jedná se o ranou fázi uložení, a korozní produkty tak vznikají zpočátku v pórovém systému bentonitu. Až na vzorcích s dobou uložení po vyšší stovky let a více, jako u archeologických analogů, již vrstvy rostou na rozhraní s kovem a vytlačují dříve vzniklé vrstvy s částicemi bentonitu dále od rozhraní (Stoullil et al. 2022). Kromě bentonitových částic obsahují vzorky MaCoTe a MockUp i fáze, které jsou pravděpodobně sekundárně vzniklými korozními produkty. Pravděpodobnost je vysoká u magnetitu a sideritu. Diskutabilní je pozorovaná křemičitanová fáze ($\text{Ca}_9\text{Fe}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{OH})_{20}$), u které není jisté, jestli to není primární přirozená fáze v bentonitu. Fakt, že se jedná o křemičitan a ne o hlinito-křemičitan lehce preferuje možnost sekundární fáze. Na druhou stranu, je potřeba vzít v potaz, že bentonit Rokle B75 je aktivovaný uhličitánem sodným, a jeho pórový roztok má vysoké pH (mezi 10 a 11). I kdyby se tedy jednalo o sekundární fázi, není jisté, že by se vyskytovala i v přirozeném bentonitu. Přesto však byly vzácně křemičitanové fáze v korozních produktech v přirozených podmínkách pozorovány (Forman et al. 2021).

Tab. 1 XRD výsledky pro vzorky MaCoTe a MockUp

Fáze / Semikvantitativní obsah	MockUp	MaCoTe
Montmorillonit	Majoritní	-
Křemen	Majoritní	Minoritní
Aragonit/Kalcit	<i>Stopový</i>	-
Muskovit	-	Majoritní
Anatas	<i>Stopový</i>	<i>Stopový</i>
Kaolinit	<i>Stopový</i>	<i>Stopový</i>
Siderit	Minoritní	Minoritní
Magnetit	<i>Stopový</i>	-
$\text{Ca}_9\text{Fe}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{OH})_{20}$	Minoritní	-

V Tab. 2 je uveden souhrn výsledků ze vzorků z Kiruny. Vzorky opět obsahují fáze typické pro jíl, a dále částice železné rudy (hematit a magnetit). Diskutabilní fází je klinochlor v modifikaci obsahující nezanedbatelné množství železnatých kationtů. Mohlo by se jednat o sekundární fázi vzniklou precipitací rozpuštěných specií nebo přímo transformací alterovaných částic jílu. Proti této domněnce však svědčí velmi vysoký obsah ve vzorku C, ve kterém jde o majoritní fázi, a takový vysoký obsah není pro sekundární fázi pravděpodobný.

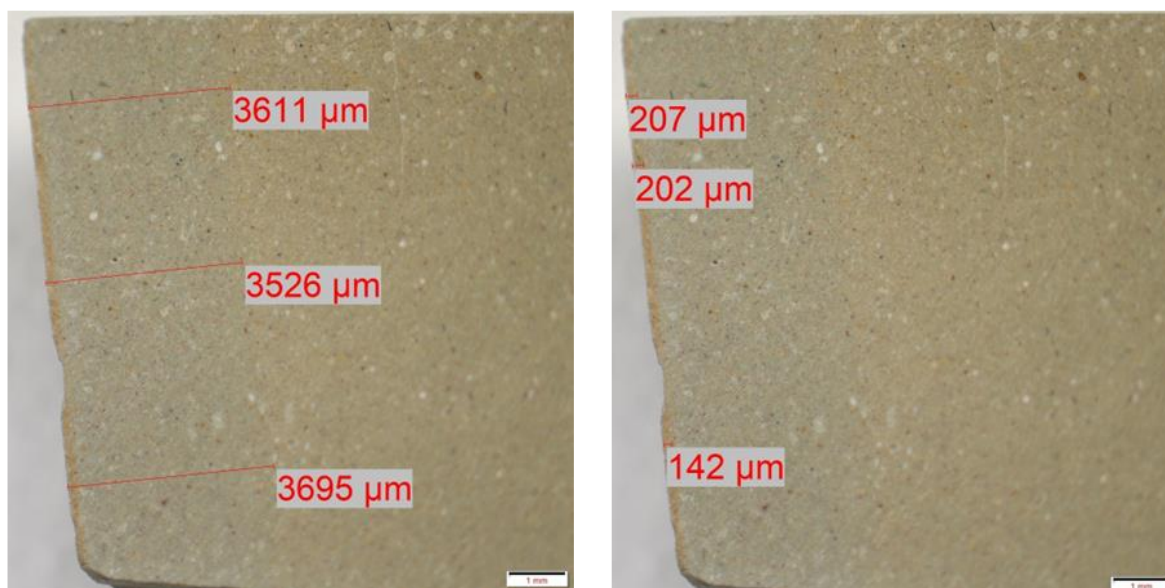
Tab. 2 XRD výsledky pro vzorky z Kiruny

Fáze / Semikvantitativní obsah	Kina A	Kina B	Kina C
Montmorilonit	Minoritní	Majoritní	Minoritní
Křemen	Minoritní	<i>Stopový</i>	Minoritní
Aragonit/Kalcit	Minoritní	Minoritní	<i>Stopový</i>
Muskovit	Minoritní	-	-
Anatas	<i>Stopový</i>	-	-
Kaolinit	-	-	-
Biotit	Minoritní	<i>Stopový</i>	-
Albit	<i>Stopový</i>	<i>Stopový</i>	<i>Stopový</i>
Klinochlor (Fe ²⁺)	Minoritní	<i>Stopový</i>	Majoritní
Hematit	<i>Stopový</i>	-	<i>Stopový</i>
Magnetit	Minoritní	<i>Stopový</i>	Minoritní

3 Mikroanalýzy

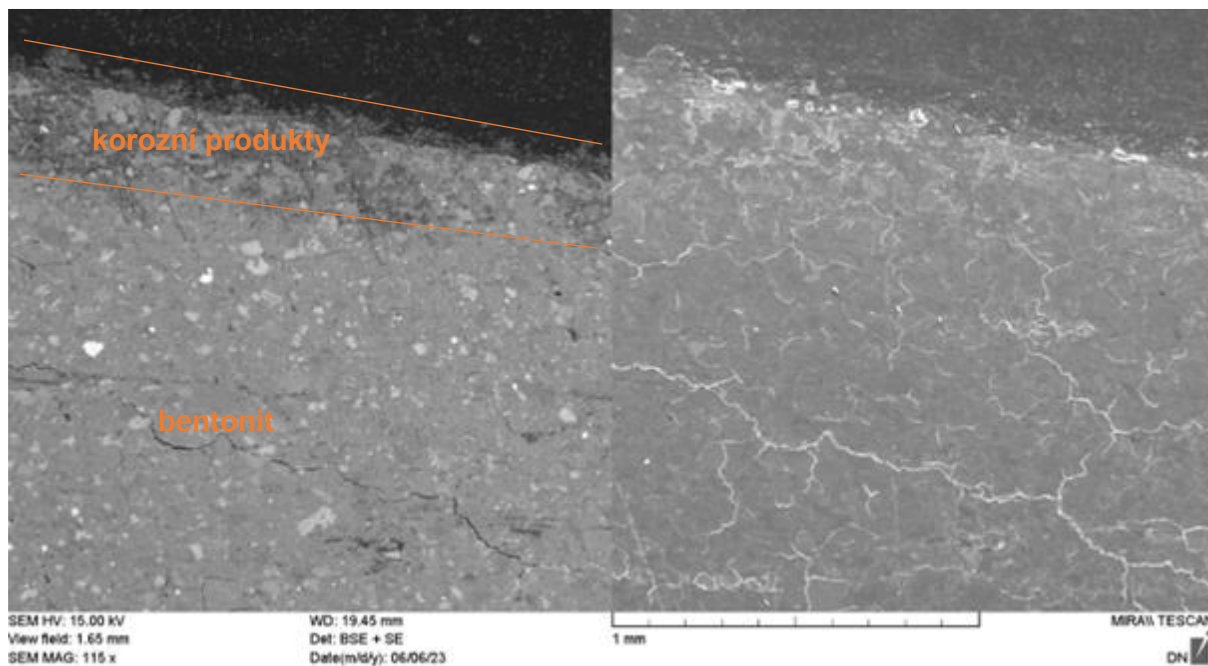
Pro analýzy pomocí scanovacího elektronového mikroskopu (SEM/EDS) byly vzorky zality za sníženého tlaku do epoxidové pryskyřice. Vzorky pak byly vybroušeny pomocí brusných papírů se vzrůstající zrnitostí, finální broušení probíhalo na nejjemnějším papíře zrnitosti P4000. Od leštění bylo upuštěno, aby diamantová pasta uvízla v pórech neovlivňovala analýzy. Vzorky byly opatřeny vrstvou zlata o tloušťce 0,5 nm a podrobeny analýze pomocí mikroskopu MIRA II (TESCAN).

Makrosnímky kolmému řezu vzorku MockUp jsou uvedeny na Obr. 2. Šířka vrstvy alterovaného bentonitu se pohybuje okolo 3,5 mm, zatímco vrstva s vyprecipitovanými pevnými korozními produkty je kolem 0,2 mm.

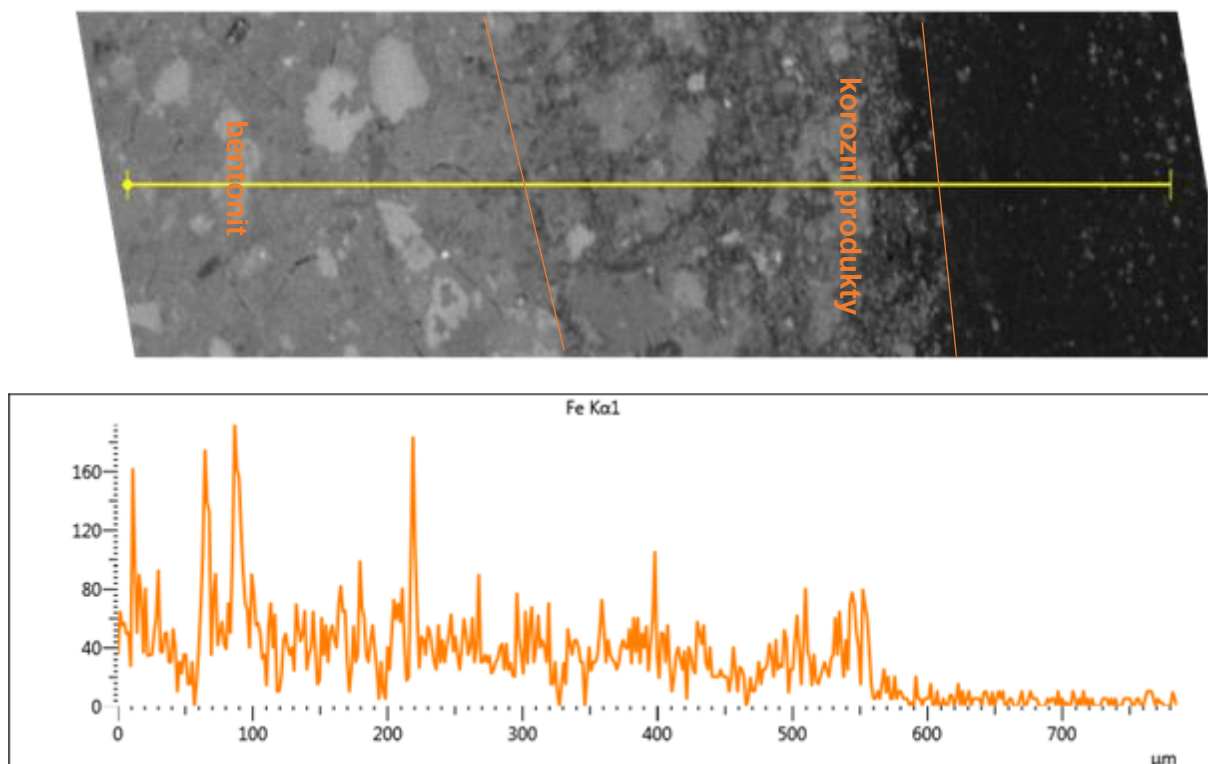


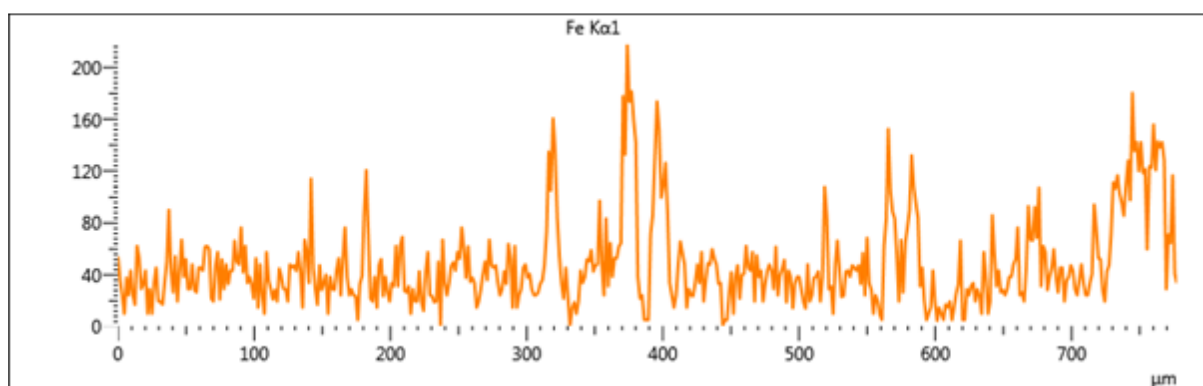
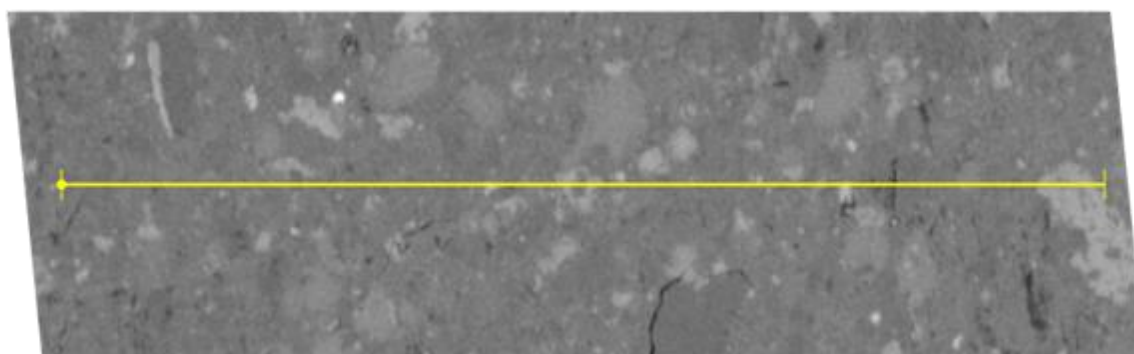
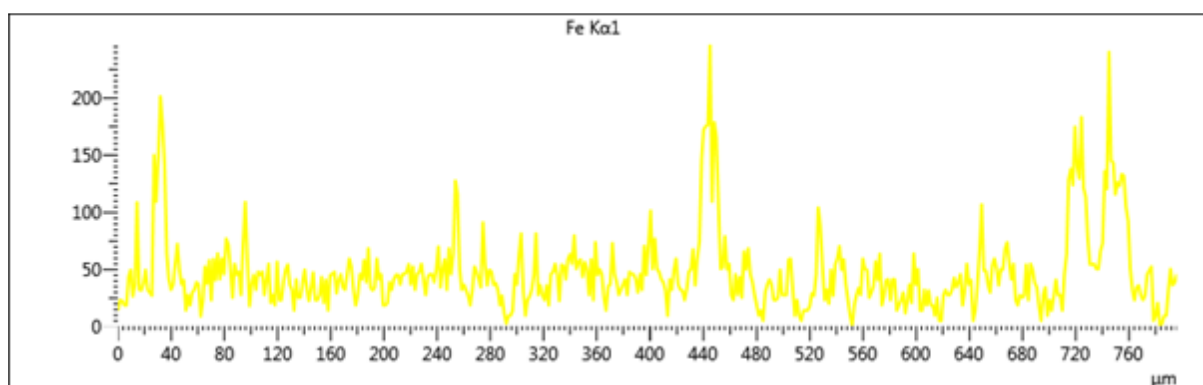
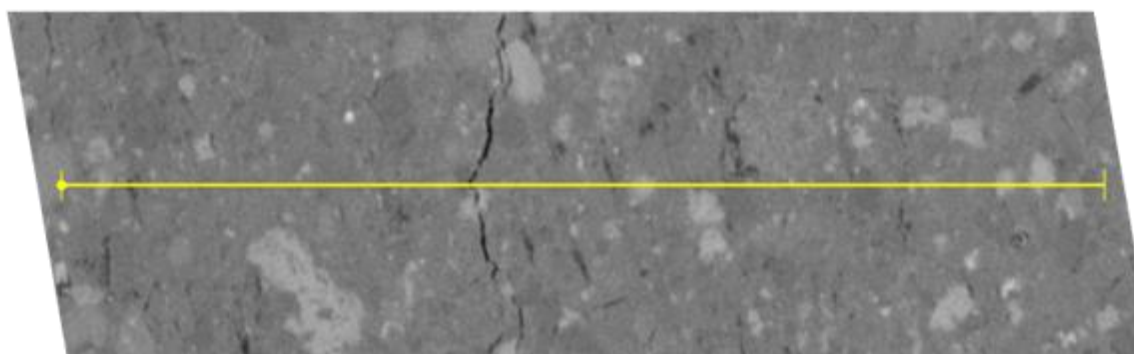
Obr. 2 Makrosnímky kolmému řezu vzorku MockUp: měření alterované vrstvy bentonitu (vlevo) a vrstvy korozních produktů (vpravo)

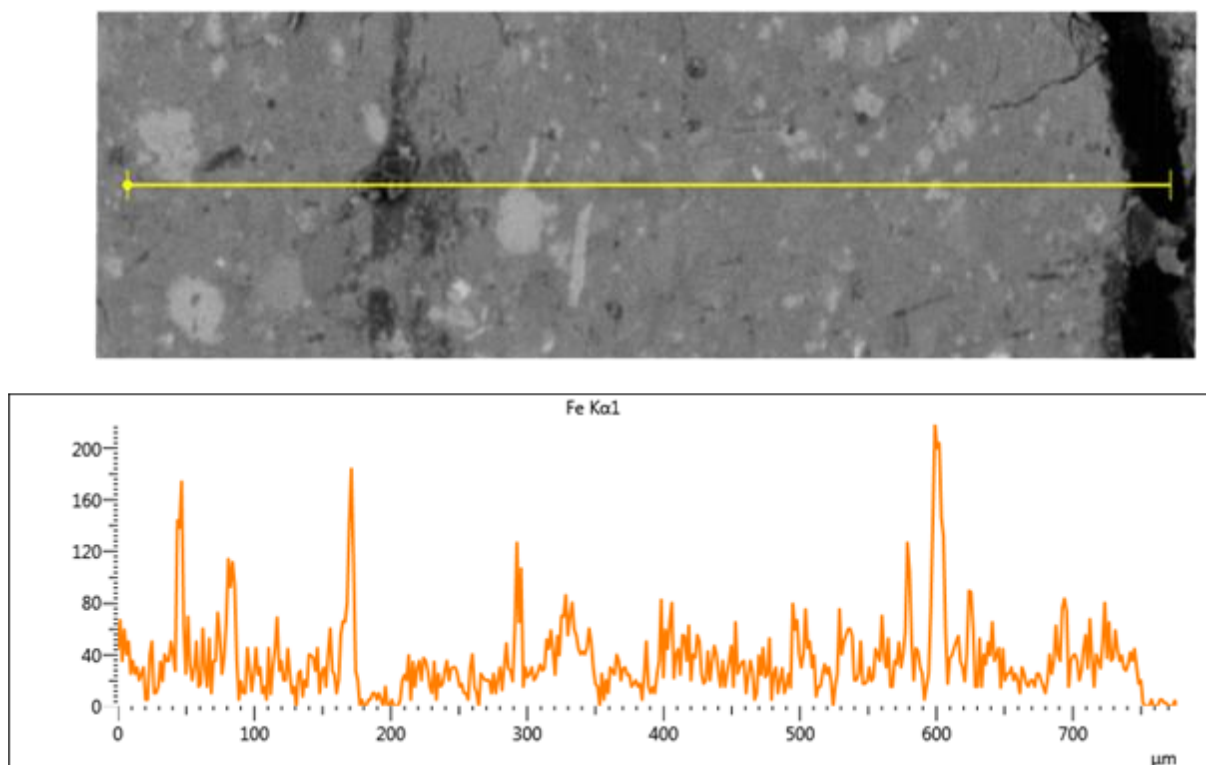
Na Obr. 3 je uveden snímek povrchové vrstvy bentonitu s korozními produkty. Následující Obr. 4 uvádí liniové analýzy obsahu Fe. Koncentrace Fe nevykazuje žádný zvýšený obsah ve směsi s korozními produkty, ani pak dále jakýkoli náznak koncentračního gradientu směrem do objemu bentonitu. Koncentrace Fe je stále konstantní a stejná jako v neovlivněném bentonitu.



Obr. 3 Snímek vzorku MockUp ze SEM: vlevo snímek BSE, vpravo SE







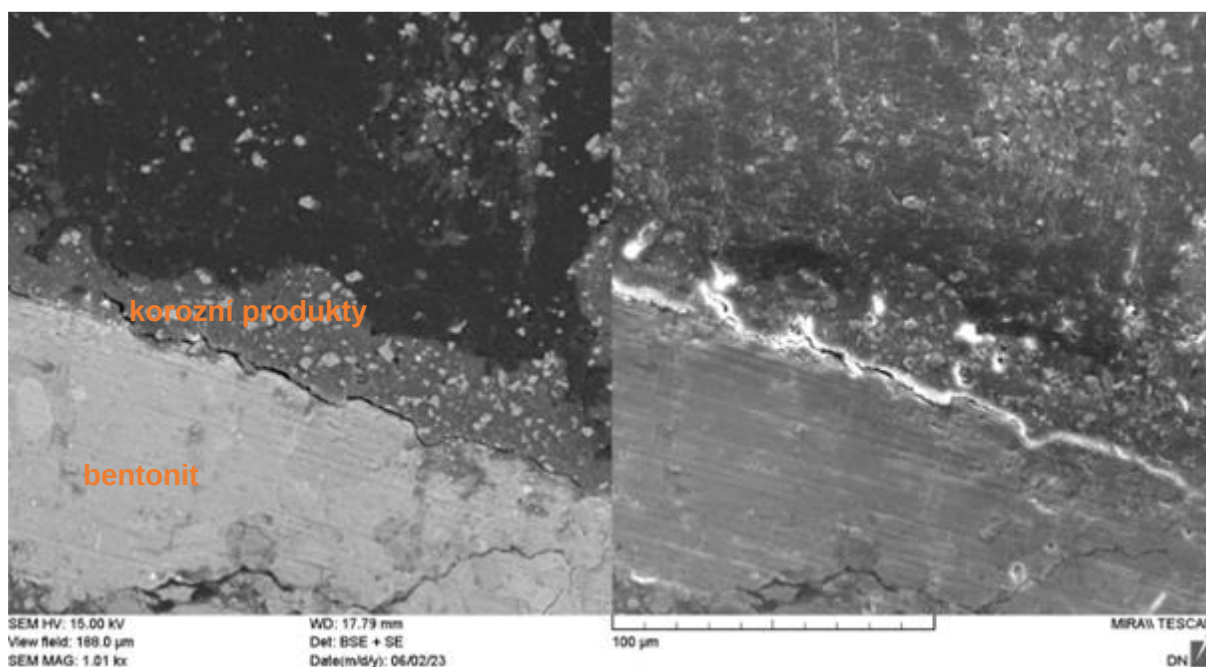
Obr. 4 Vzorek MockUp - liniová analýza obsahu Fe: odshora 1. rozhraní přes vrstvu s korozními produkty, 2. v alterovaném bentonitu, 3. rozhraní alterovaný/nealterovaný bentonit, 4. nealterovaný bentonit

Kolmý řez vzorku MaCoTe je v makrosnímku uveden na Obr. 5. Průnik alterace bentonitu je obdobný jako u vzorku MockUp, a pohybuje se na úrovni 3 mm.

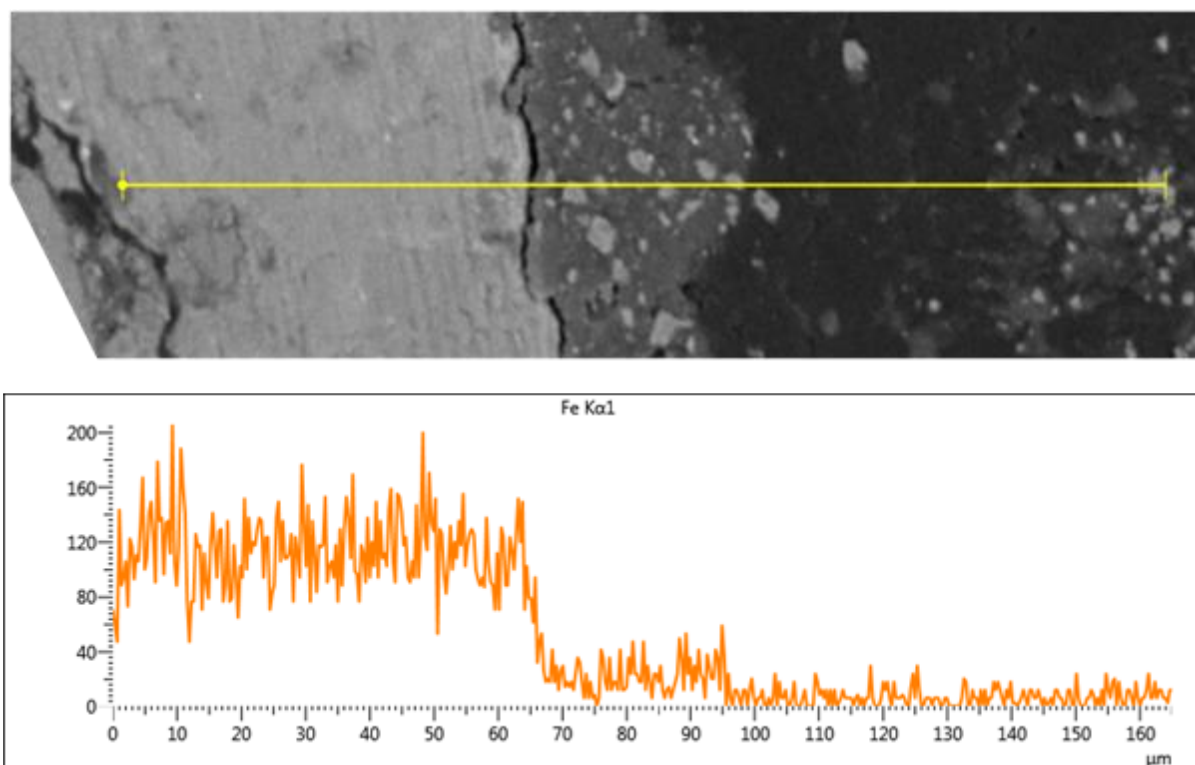


Obr. 5 Makrosnímky kolmého řezu vzorku MaCoTe: měření alterované vrstvy bentonitu

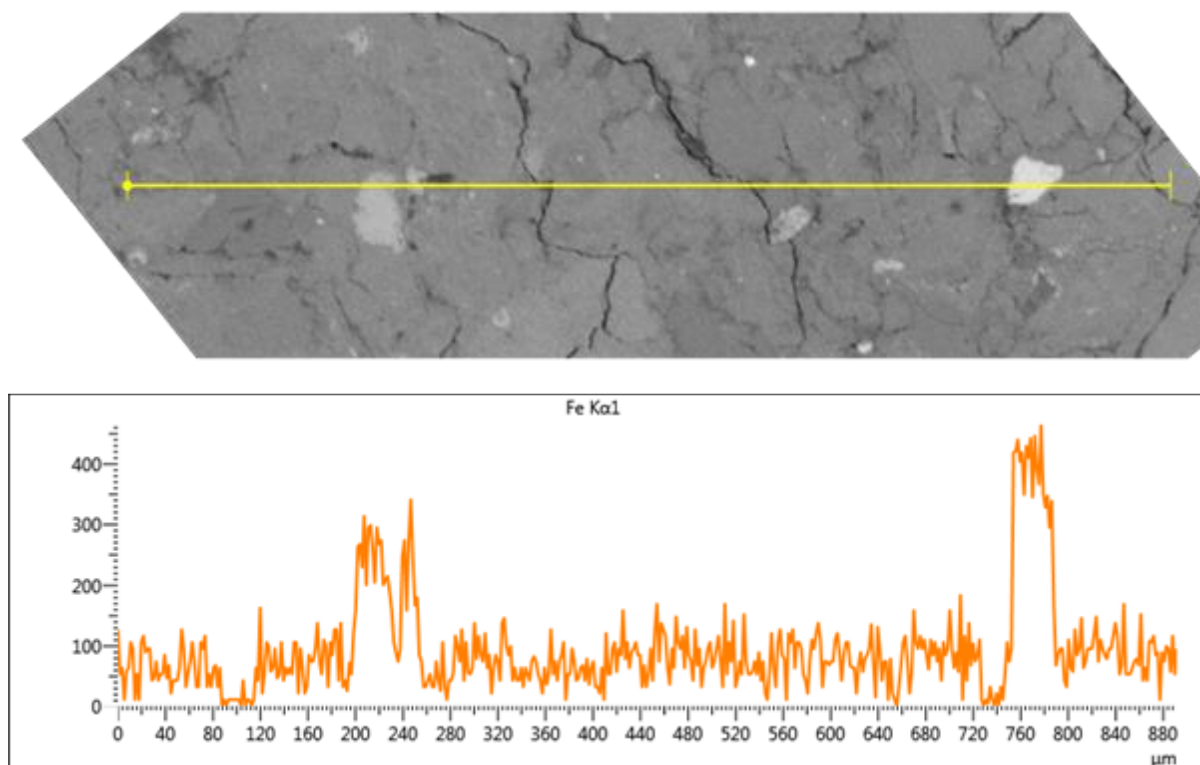
SEM snímky na Obr. 6 ukazují velmi jasně vrstvu korozních produktů, která je mnohem jasněji zřetelná, a patrně obsahuje mnohem méně částic bentonitu. Liniový scan koncentrace Fe přes rozhraní korozní produkty/bentonit zobrazuje Obr. 7. Zatímco u předchozího vzorku MockUp byla intenzita signálu Fe podobná v bentonitu i v korozních produktech, u vzorku MaCoTe je intenzita podobná pro korozní produkty, ale pro kompaktní bentonit BaM je vyšší. Nicméně, ani v tomto případě nebyl zaznamenán žádný gradient koncentrace, a přechody jsou velmi strmé. Intenzita signálu je pak podobná i v hloubce nealterovaného bentonitu, viz Obr. 8. Na Obr. 6 byly ve vrstvě korozních produktů patrné částice s vyšší hustotou než okolí. Jedna tato světlejší částice byla analyzována v detailu na Obr. 9. Jak je patrné z prvkové mapy, vyšší obsah uhlíku naznačuje, že tyto částice jsou siderit.



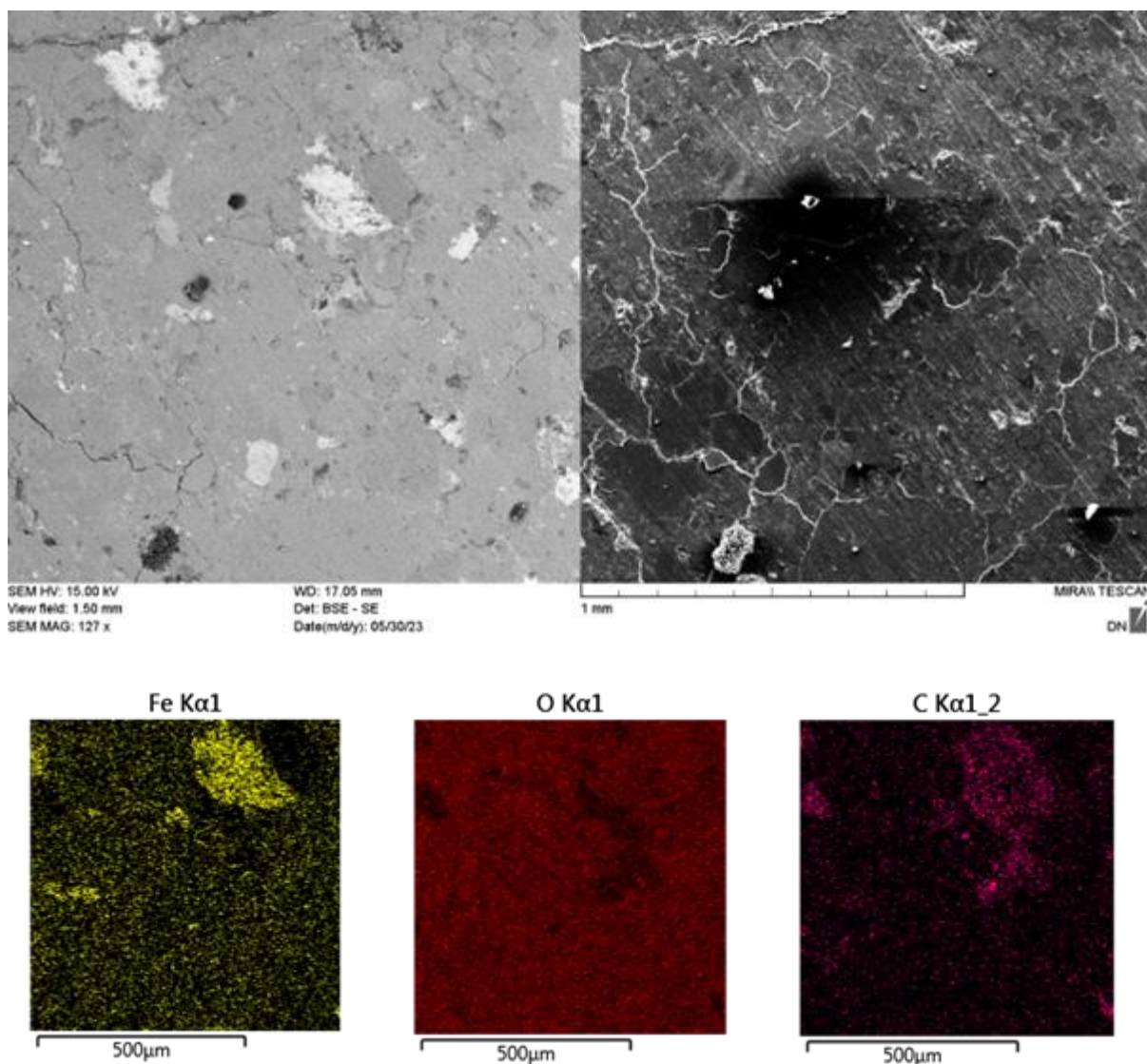
Obr. 6 Snímek vzorku MaCoTe ze SEM: vlevo snímek BSE, vpravo SE



Obr. 7 Vzorek MaCoTe - liniová analýza obsahu Fe: rozhraní přes vrstvu s korozními produkty

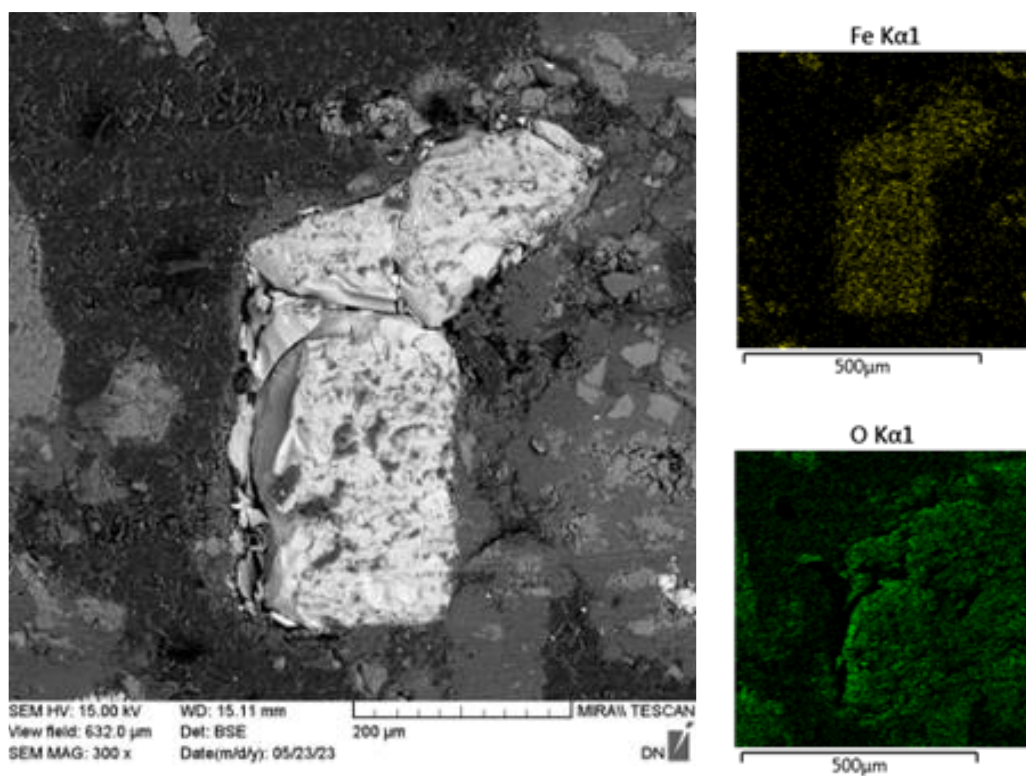


Obr. 8 Vzorek MaCoTe - liniová analýza obsahu Fe: nealterovaný bentonit

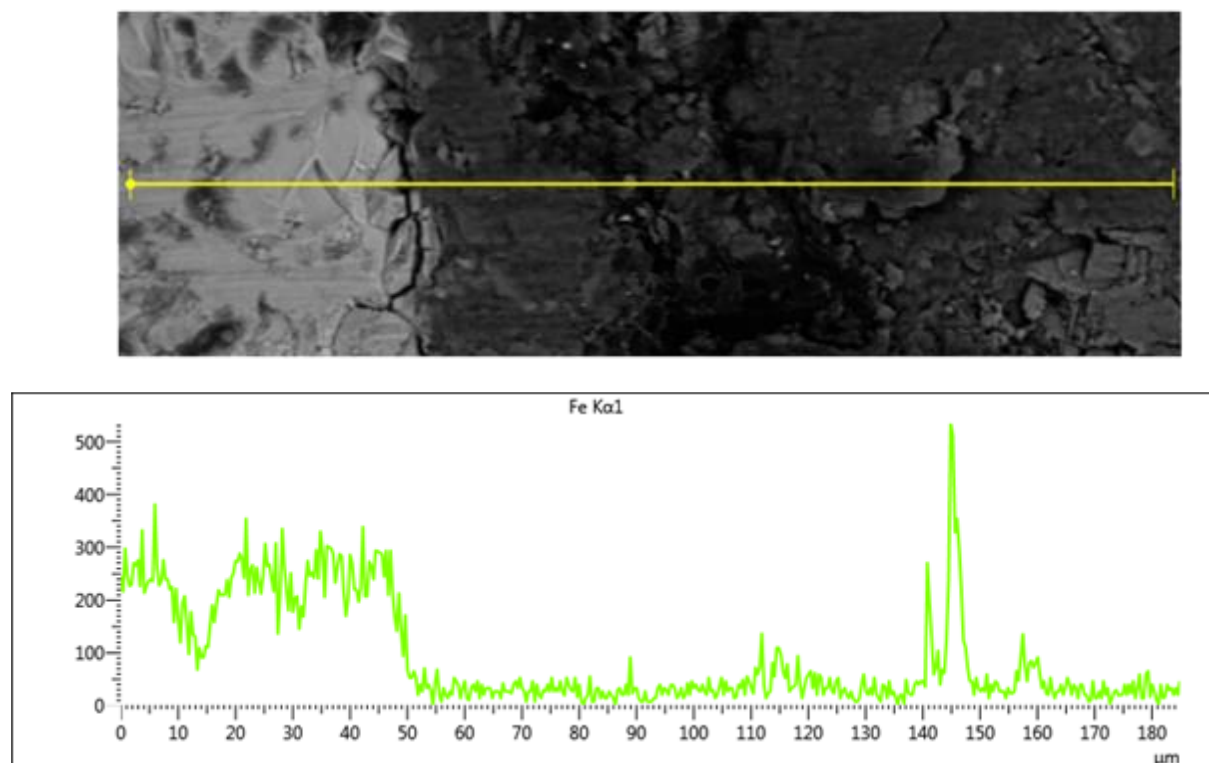


Obr. 9 Vzorek MaCoTe – EDS mapa: identifikace částic korozních produktů s vyšší hustotou (siderit)

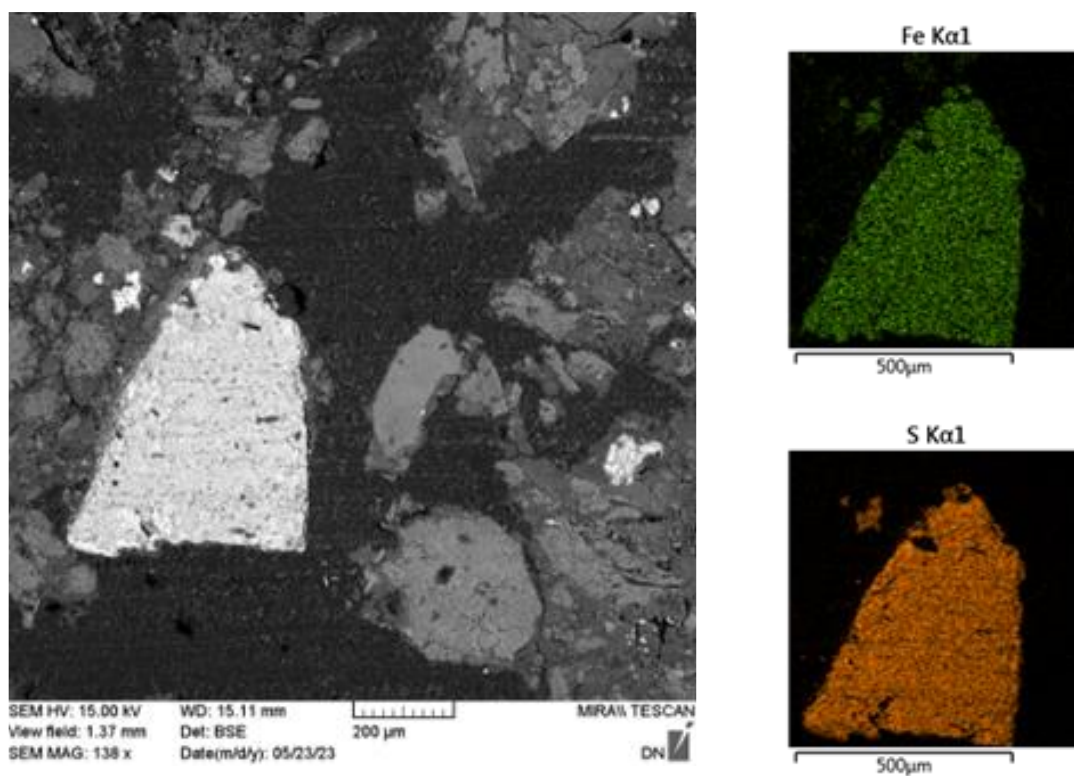
Ve vzorcích Kiruna A a B jsou shodně oxidické (Obr. 10, Obr. 16) i sulfidické (Obr. 12, Obr. 14) částice železné rudy. U sulfidu se jedná pravděpodobně o pyrit, jehož celkový objemový podíl je však pod mezí detekce XRD, a při fázové analýze tak nebyl detekován. Obr. 11, Obr. 13, Obr. 15 a Obr. 17 sumarizují koncentrační gradient v okolí částic, který je opět velmi strmý a nesvědčí tak pro jakoukoli precipitaci sekundárních korozních produktů v okolí, ani výraznou alteraci jílu.



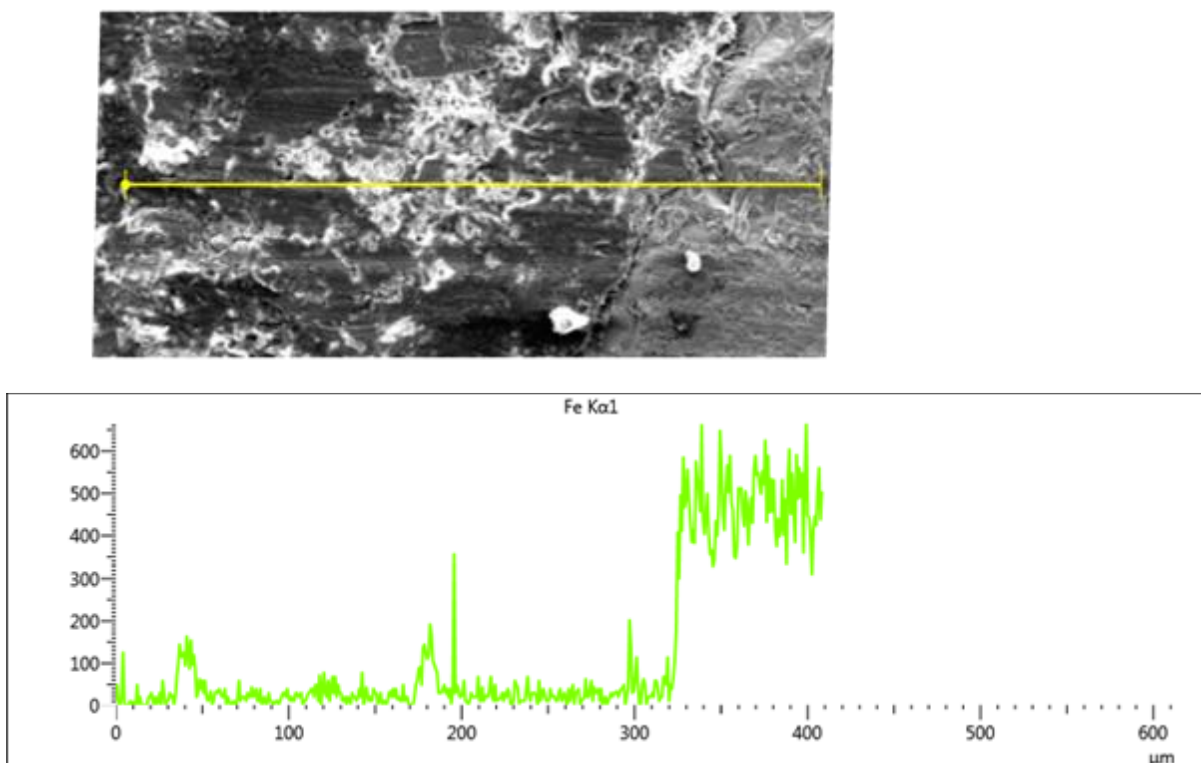
Obr. 10 Vzorek Kiruna A – EDS mapa: oxidická částice



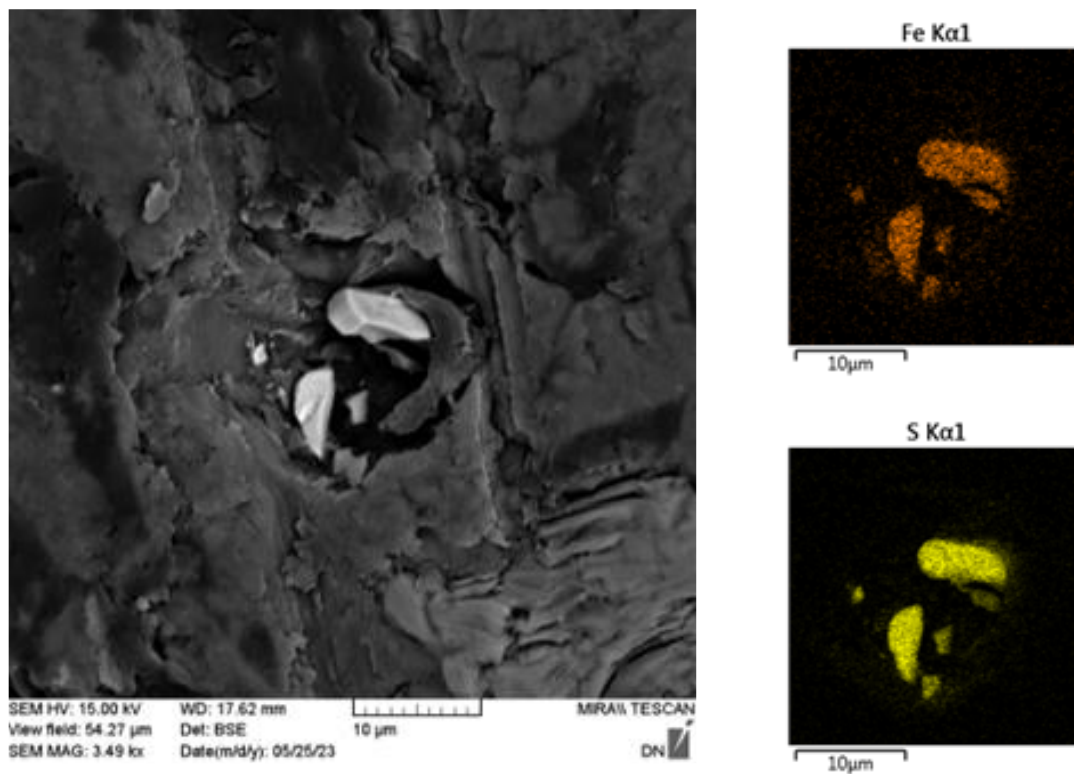
Obr. 11 Vzorek Kiruna A – liniová analýza koncentrace Fe: rozhraní oxidická částice - jíl



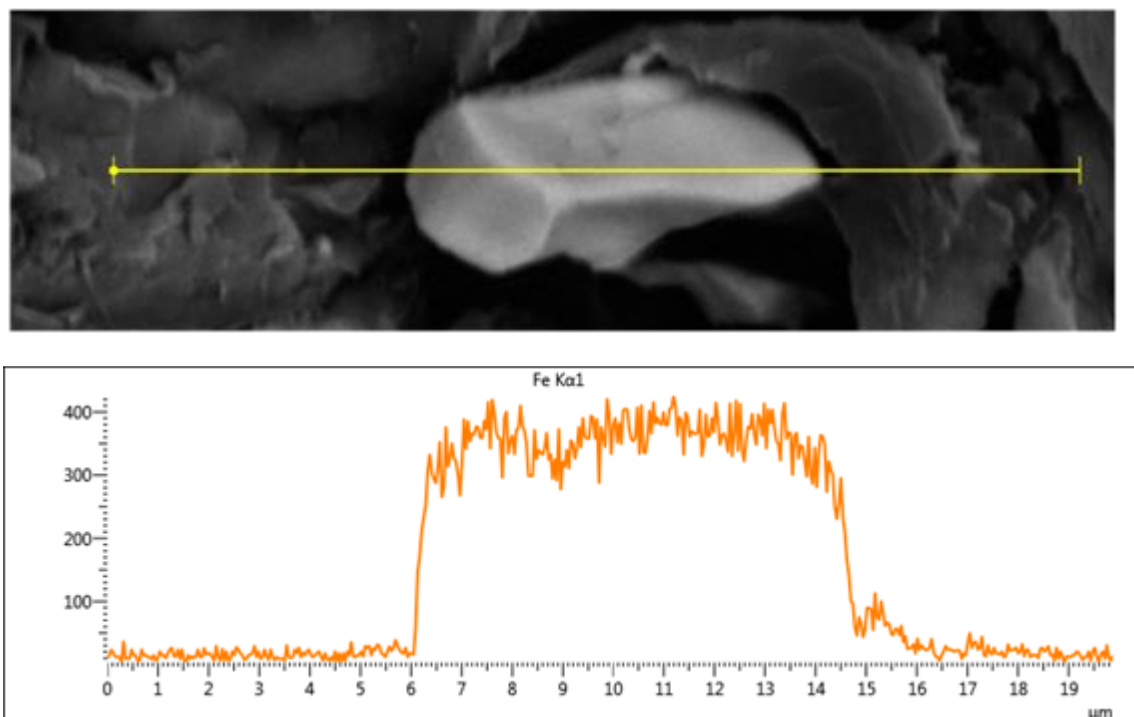
Obr. 12 Vzorek Kiruna A – EDS mapa: sulfidická částice



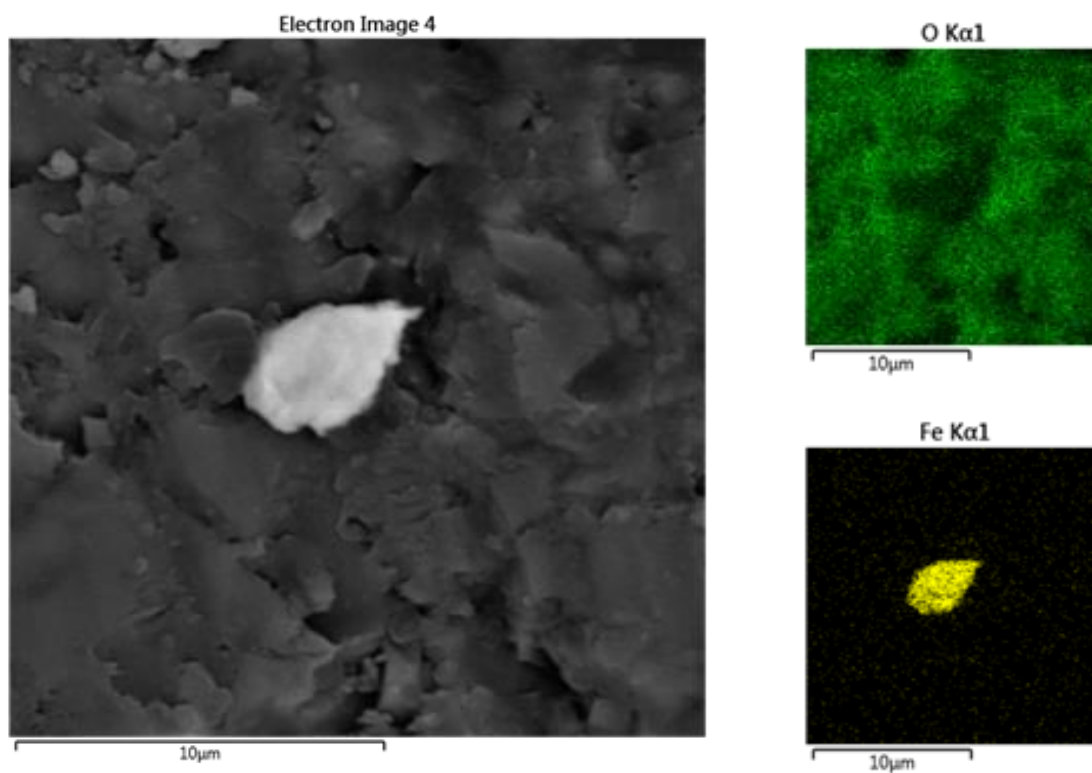
Obr. 13 Vzorek Kiruna A – liniová analýza koncentrace Fe: rozhraní sulfidická částice - jíl



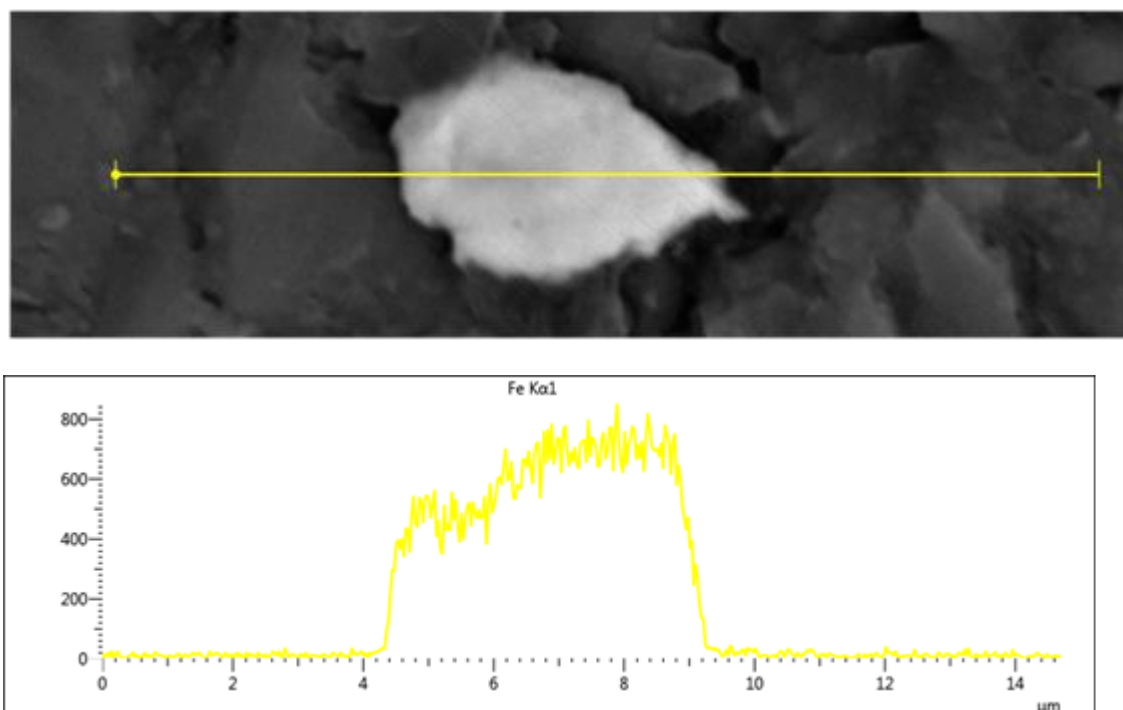
Obr. 14 Vzorek Kiruna B – EDS mapa: sulfidická částice



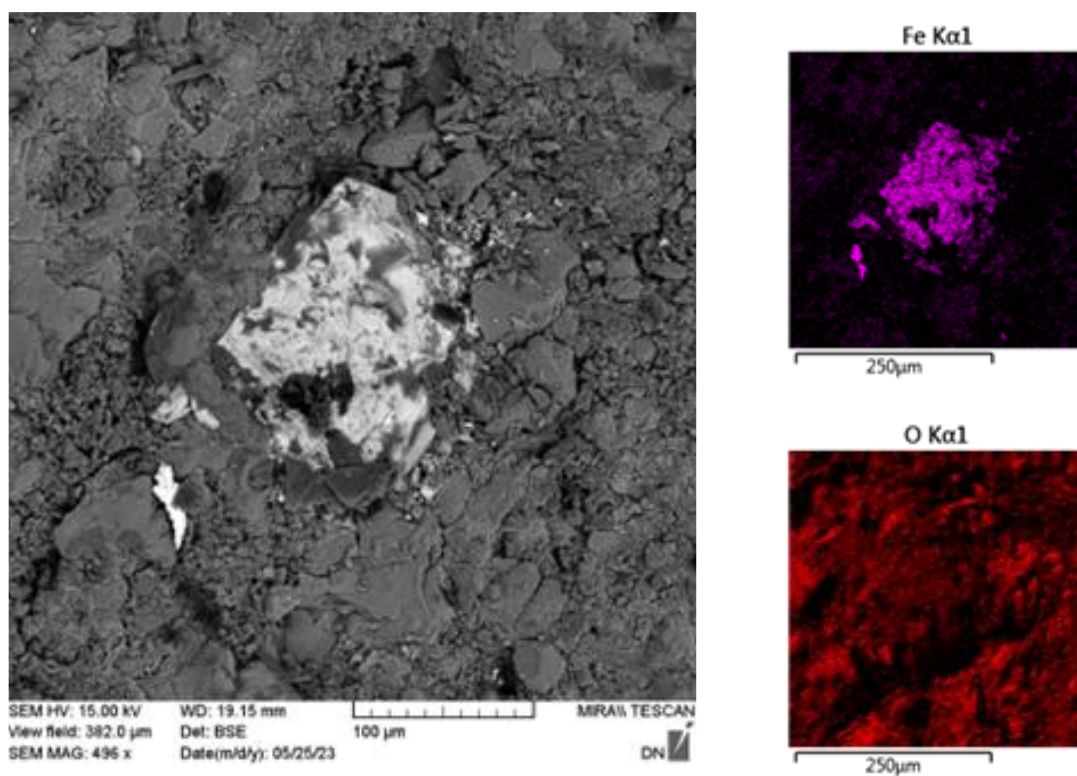
Obr. 15 Vzorek Kiruna B – liniová analýza koncentrace Fe: rozhraní sulfidická částice - jíl



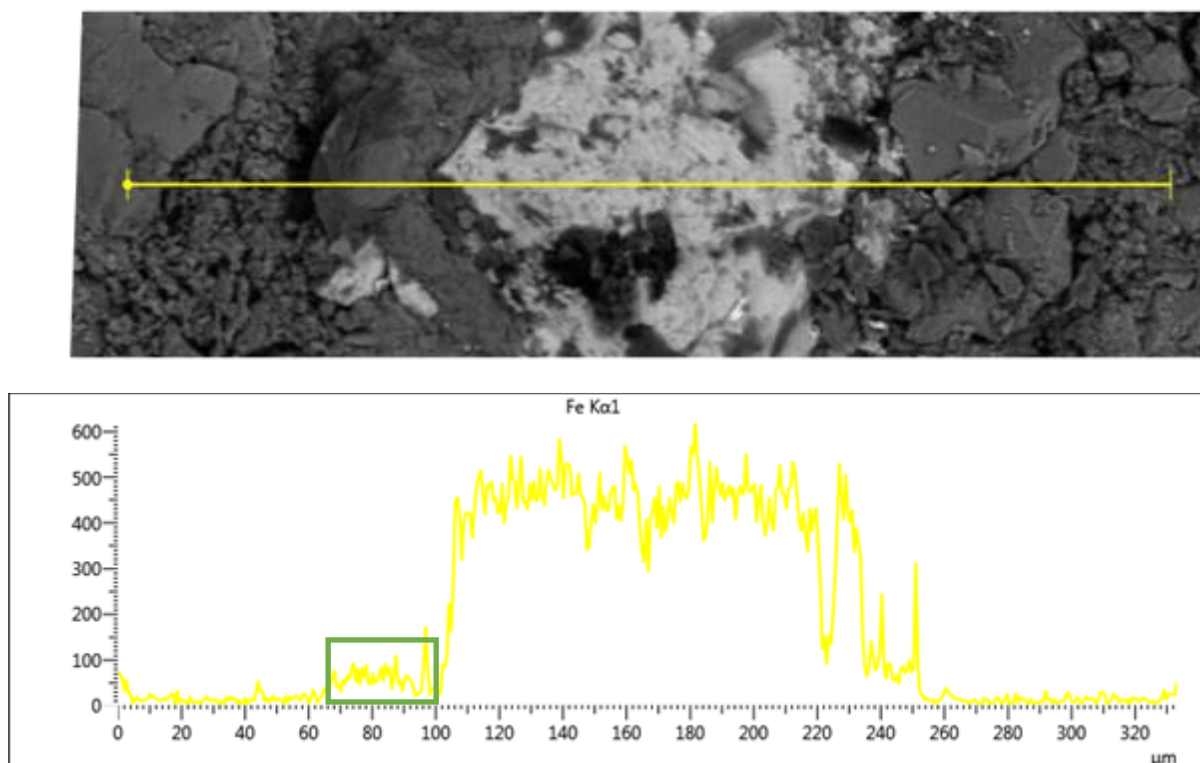
Obr. 16 Vzorek Kiruna B – EDS mapa: oxidická částice

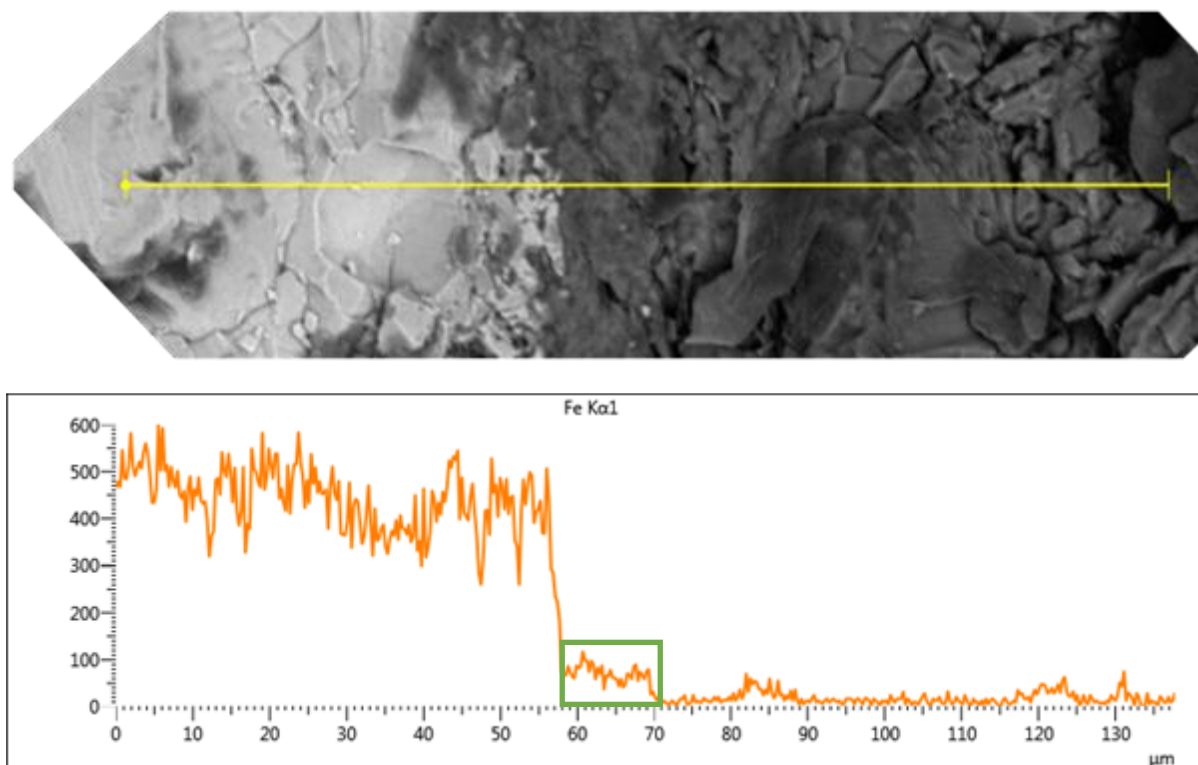


Obr. 17 Vzorek Kiruna B – liniová analýza koncentrace Fe: rozhraní oxidická částice - jíl



Obr. 18 Vzorek Kiruna C – EDS mapa: oxidická částice



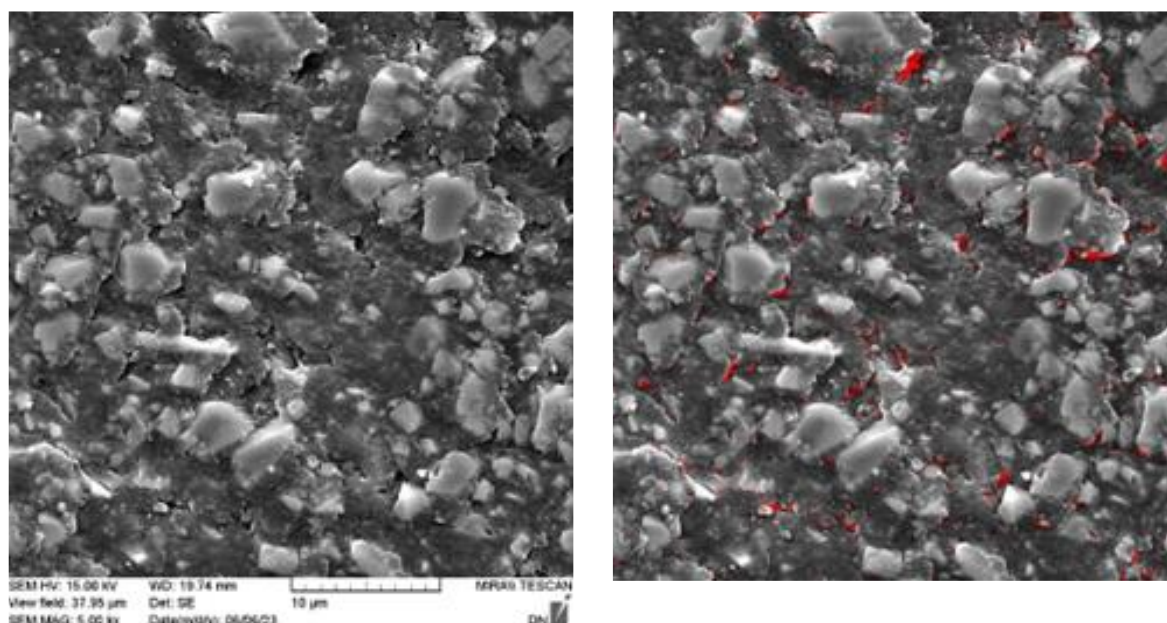


Obr. 19 Vzorek Kiruna C – liniová analýza koncentrace Fe: rozhraní oxidická částice - jílu (nahore stejná částice jako na Obr. 18, dole jiná částice na stejném vzorku)

Vzorek Kiruna C obsahoval pouze oxidické částice, viz Obr. 18. Na vzorcích Kiruna C byly nalezeny oblasti, kde je zvýšený obsah Fe v jílu v těsné blízkosti částice (Obr. 19). Stejná místa však nejsou u všech částic, ani nejsou kontinuálně po celém obvodu jedné částice. Nelze tak s jistotou prohlásit, že by se jednalo o výrazně alterovaný jílu a spíše se jedná o nerovnosti na povrchu vyplněné jílem a EDS signál z obou fází.

4 Pórovitost

Stanovení pórovitosti probíhalo pomocí dvou technik. Nejprve byla stanovena na výbrusech pomocí SEM makropórovitost. Pro zvětšení 5 000 jsou nejmenší viditelné póry přibližně o rozměru 100 nm. Každý snímek povrchu byl naprahován a byla stanovena plocha pórů ku celkové ploše snímku, viz Obr. 20. Mikropórovitost byla stanovena pomocí metody BET. Z každého vzorku byl odebrán podlouhlý kompaktní kus o hmotnosti 1-2 g, který se vešel do testovací trubice o průměru 10 mm.



Obr. 20 Naprahování snímku a odečtení plošného podílu makropórů (vzorek MockUp)

Souhrnný plošný podíl pórů, který může být považován za reprezentativní i z hlediska objemového podílu, je uveden pro všechny vzorky v Tab. 3. Vzorky z Kiruny obsahují určité výrazně nižší množství sekundárních fází než vzorky MockUp a MaCoTe, které mají výrazný podíl sekundárních korozních produktů. Rozptyl výsledků je značný pro všechny typy vzorků a výrazně závislý na konkrétním místě na vzorku. Makropórovitosti se pohybují od 0,1 obj.% až do 5,8 obj.%. Pro porovnání lze uvést makropórovitosti vzorků z projektu Archeologické Analogy (Stoulil et al. 2022), kdy se hodnoty pohybovaly od 2 do 7 obj.%.

Výsledky měření mikropórovitosti jsou uvedeny v Tab. 4. Údaje pro vzorky z Kiruny jsou spíše orientační, není jisté, jestli je mikropórovitost ovlivněna precipitací sekundárních fází nebo mechanickými vlivy. U vzorků MaCoTe a MockUp už se jedná o skutečnou mikropórovitost směsi korozních produktů a bentonitu. Hodnoty jsou stále velmi vysoké, uvažíme-li původní přibližnou pórovitost kompaktovaného bentonitu, která pro suchou hustotu 1500 kg.m^{-3} bude maximálně 48 obj.%. Analyzované korozní produkty MaCoTe (34,6 obj.%) a MockUp (27,8 obj.%) jsou však stále pouze krátkodobé z hlediska plánovaných dob uložení. Pro porovnání jsou dlouhodobé korozní produkty na archeologických analozích výrazně níže s mikropórovitostí. Ta se pohybovala od 1 do 22 obj.%, ale 9 lokalit z 15 mělo mikropórovitost v úzkém rozmezí 15-18 obj.% (Stoulil et al. 2022).

Tab. 3 Souhrn dat z měření makropórovitosti

Vzorek / Makropórovitost	Průměr	σ	MIN	MAX
Kiruna A	0.012	± 0.007	0.003	0.027
Kiruna B	0.018	± 0.010	0.001	0.033
Kiruna C	0.009	± 0.010	0.001	0.035
MaCoTe	0.012	± 0.009	0.002	0.024
MockUp	0.025	± 0.021	0.003	0.058

Tab. 4 Souhrn dat z měření mikropórovitosti

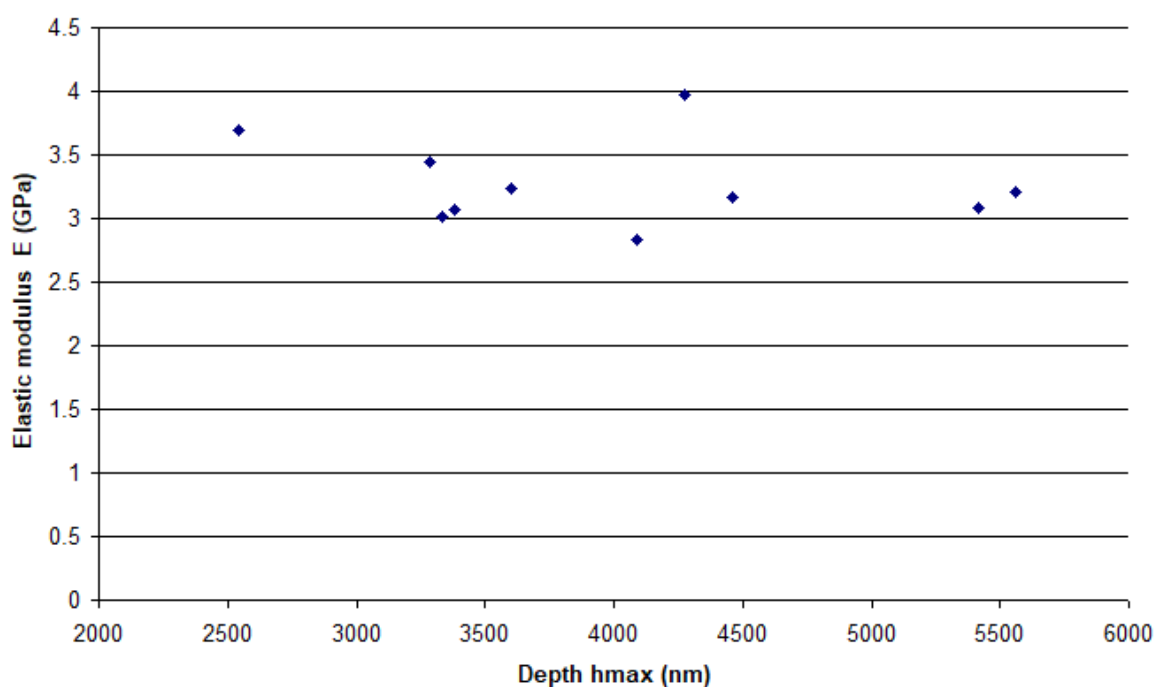
Vzorek	Mikropórovitost
Kiruna A	0.012
Kiruna B	0.109
Kiruna C	0.083
MaCoTe	0.346
MockUp	0.278

5 Mechanické vlastnosti (nanoindentace)

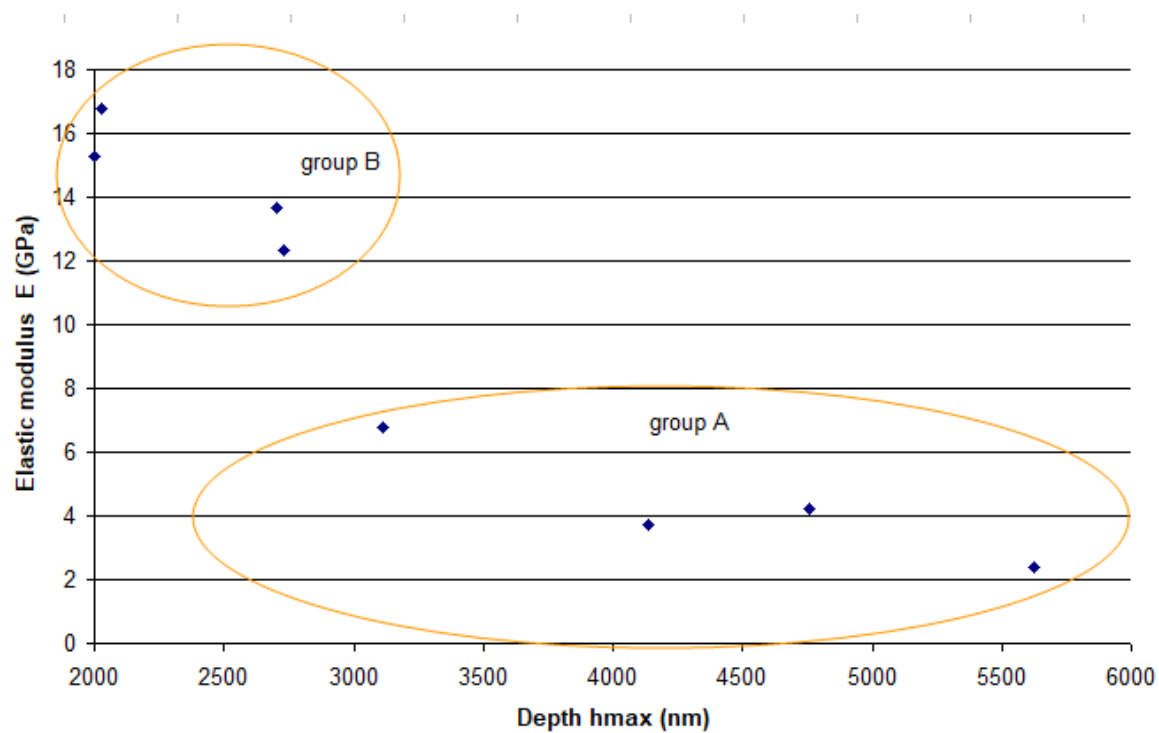
Kolmé řezy vzorků zalité v epoxidové pryskyřici a vybroušené (viz Kap. 3) byly podrobeny nanoindentačnímu testování. Podrobnosti experimentů je možné nalézt v Příloze 2. Zde jsou uvedeny jen souhrnné výsledky měření modulu pružnosti, což je hlavní veličina vypovídající o mechanickém chování agregátů korozních produktů.

Korozní produkty vzorku MaCoTe (Obr. 21) se chovají homogenně od rozhraní až do hloubky několika mikrometrů vrstvy korozních produktů. Průměrná hodnota modulu pružnosti je 3,3 GPa. U vzorku MockUp (Obr. 22) se vnější část vrstvy chovala rozdílně. Pravděpodobně je to způsobeno vyšší mírou kompaktizace, zatečením konsolidační pryskyřice do větší hloubky vrstvy nebo horším kontaktem indentoru s nedostatečně rovným povrchem. Hodnoty ve větší hloubce pod povrchem vrstvy korozních produktů jsou oproti vnější vrstvě nižší, a pohybují se na úrovni 4,3 GPa.

Porovnáme-li hodnoty mikropórovitosti a modulu pružnosti (E), je mezi nimi korelace. Vrstva s vyšší pórovitostí má nižší modul pružnosti. Vzorek MaCoTe mikropórovitost 34,6 obj.% a $E = 3,3$ GPa; vzorek MockUp mikropórovitost 27,8 obj.% a $E = 4,3$ GPa; a porovnání s archeologickými analogy z lokality Žehuň (Stoulil et al. 2022) mikropórovitost 16 obj.% a E v rozmezí 8 – 52 GPa.



Obr. 21 Výsledek nanoindentačního měření modulu pružnosti korozních produktů na vzorku MaCoTe



Obr. 22 Výsledek nanoindentačního měření modulu pružnosti korozních produktů na vzorku MockUp

6 Závěr

Byly analyzovány vzorky ze dvou dlouhodobých experimentů v podmínkách dlouhodobých experimentů v podzemních laboratořích a 3 vzorky z dolu Kiruna, kde jsou dlouhodobě v kontaktu částice železné rudy a jílu bohatého na smektit.

Ve vzorcích z Kiruny nebyly prokázány žádné sekundární křemičitanové fáze s kationty železa. Ani alterace jílu v okolí částic není analyticky prokazatelná. Předchozí experimentální pozorování pouze marginální a velmi lokalizované přítomnosti křemičitanových korozních produktů při několikaletých laboratorních experimentech (Forman et al. 2021), i nestanovitelné množství křemičitanových korozních produktů u archeologických analogů po minimálně několikasetleté expozici (Stoulil et al. 2022), nejsou nijak v rozporu se vzorky z Kiruny, které jsou exponovány minimálně v řádu stovek miliónů let. Pro modely životnosti tak není třeba brát (hlinito)křemičitanové fáze v úvahu.

Na vzorcích MaCoTe a MockUp je hlavním korozním produktem siderit. I u těchto několikaletých experimentů se stále jedná o relativně krátkodobý kontakt, a korozní produkty jsou stále promíchány s částicemi bentonitu. Přestože alterace bentonitu kationty železa je vizuálně snadno identifikovatelná, je obsah železa stále pod detekční schopností metody SEM/EDS. Ze stejného důvodu krátké doby expozice jsou korozní produkty ještě neúplně utěsněné a mají vysokou mikropórovitost, která přímo ovlivňuje i mechanické vlastnosti, v této práci reprezentované modulem pružnosti. Pro využití modelů probíhajícího projektu Bezpečnost 2 však bude potřeba údaje o mechanických vlastnostech sideritu ještě ověřit na kompaktnějších vzorcích čistého minerálu a simulovaných vzorcích laboratorních.

Reference

FORMAN L. a kol. (2021) Závěrečná technická zpráva výzkumná část projektu Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stadia realizace vzorku. ZZ SÚRAO 544/2021.

GILG H. A. a ANDERSSON U. B. (2020) Geology of deep clay alteration zones in the Kiirunavaara and other iron ore deposits, northern Norrbotten, Sweden. Nagra Report.

GONDOLLI J. a kol. (2018) Korozní produkty – závěrečná zpráva. TZ SÚRAO 329/2018.

STOULIL J. a kol. (2022) Archeologické analogy pro verifikaci modelů životnosti kontejneru pro hlubinná úložiště radioaktivního odpadu. TZ SÚRAO 623/2022.

ZUNA M. a kol. (2023): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí – zapojení v projektu Material Corrosion Test (MaCoTe), část zakázky č. 2 realizace a vyhodnocení MaCoTe experimentu v Grimsel Test Site, TZ SÚRAO.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

www.surao.cz