

Výsledky laboratorních experimentů simulujících injektování CO₂ do miocenních pískovců labského horizontu ve vídeňské pánvi (ČR)

Results of Laboratory Experiments Simulating CO₂ Injection into Miocene Sandstones of the Elbe Horizon in the Vienna Basin (Czech Republic)

MARTINA MOLKOVÁ – MONIKA LIČBINSKÁ – MARTIN KLEMPA

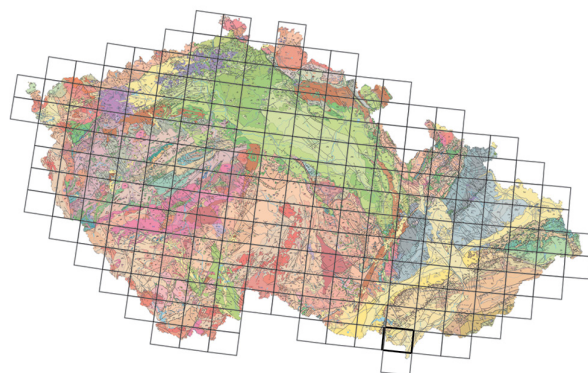
Katedra geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta,
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15,
708 00 Ostrava; martina.molkova@vsb.cz

Please cite this article as: Molková, M. – Ličbínská, M. – Klempa, M.
(2025): Results of Laboratory Experiments Simulating CO₂ Injection
into Miocene Sandstones of the Elbe Horizon in the Vienna Basin
(Czech Republic) – Geosciences Research Reports, 58, 2, 118–123.
(in Czech)

Key words: reaction chamber, rock-water-CO₂ interactions, sandstone
reservoir, Elbe horizon, CO₂ injection

Summary: Geological storage of CO₂ is possible thanks to physico-chemical processes, one of which is mineral trapping. Structural, stratigraphic or hydrodynamic mechanisms predominate at CO₂ injection whereas other processes evolve later on. The latter are governed primarily by flow of media in liquid and gaseous form driven by pressure and gravity or capillary forces, and heat transfer by convection and by diffusion. Transport of aqueous and gaseous species by advection and by molecular diffusion is considered.

After the CO₂ injection is complete, a number of capture mechanisms become significant. Part of CO₂ is captured by residual trapping as the carbonate solution moves away from the injection zone. At the same time, the gas is mixed with the formation water and dissolves in it (solubility trapping). The dissociation of CO₂ dissolved in reservoir waters enhances acidity of the environment that promotes interaction with the rock-forming minerals and rapid dissolution of carbonates (if present) in the acidified zone around the injection well. As a result, the content dissolved bicarbonates increases (ion capture) (Saeedi et al. 2011, Sayegh et al. 1990).



(34-23 Břeclav)

The ability of rock formations to absorb and permanently sequester CO₂ is a key technical and economic parameter evaluated within the frame of the CCS projects. The feasibility of CO₂ injection depends primarily on the porosity and permeability of reservoir rocks. Nevertheless, other aspects of CO₂ interaction with host rock, such as the dissolution and precipitation of minerals, also play a significant role (Benson – Cole 2002, Gaus 2010).

This work investigates geochemical reactions of sandstone reservoir rocks with CO₂-enriched solutions, focusing on the mineralogical transformations and their consequences for geological storage. Laboratory experiments were carried out using sandstone from the Dolní Bojanovice gas storage facility (Czech Republic) in contact with demineralized water. Dissolution of clay minerals and carbonates were identified as the main chemical reactions during the phase of CO₂ injection. These reactions resulted in an increased porosity of the rocks, which directly affects the capacity of the reservoir for the CO₂ storage.

V současnosti patří mezi hlavní environmentální a klimatické problémy potřeba snižování koncentrace CO₂ v atmosféře. Zachycování a ukládání CO₂ (CCS) je jednou z klíčových metod, jak tohoto cíle dosáhnout. Tato technologie je založena na vstřikování CO₂ do porézních horninových struktur (Gaus 2010, Izeg et al. 2008). V rámci tohoto procesu dochází k významným změnám v horninovém systému (rozpuštění – srážení minerálů). Životaschopnost vstřikování CO₂ závisí zejména na pórovitosti a propustnosti úložných hornin (Saeedi et al. 2011, Sayegh et al. 1990).

Článek prezentuje laboratorní experimenty pro provádění pilotního projektu ukládání CO₂ do vyčerpaných ložisek uhlovodíků v jihovýchodní části České republiky. Lokalita Dolní Bojanovice je vytěženým ložiskem ropy a je eventuálně vhodná pro injektáž CO₂. Výzkumné metody zahrnují sběr dat, petrografický popis vzorků hornin, laboratorní analýzu vod a experimenty v reakční komoře. Cílem tohoto projektu bylo popsat vliv CO₂ ve vybraných sedimentárních geologických strukturách na mineralogické změny v těchto horninách v rámci potenciálních úložišť v České republice.

Geologická a hydrogeologická charakteristika studované lokality

Zájmová lokalita Dolní Bojanovice se nachází v jihovýchodní části České republiky a je součástí geologické jednotky zvané vídeňská pánev. Na této lokalitě reprezentuje rezervoárovou horninu labského horizontu vzorek označovaný jako DB P-106. Zmiňovaný labský horizont leží v hloubce asi 1600 m a je tvořen miocenním pískovcem starým přibližně 15,5 milionu let (stratigraficky spadajícím do středního badenu). Litologicky je vzorek jádra s označením DB P-106 popsán jako střednozrnný kalcifikovaný pískovec. Popis horniny je uveden v tabulce 1. Metodou zvanou plynová porozimetrie byla stanovena hodnota porozity na 19,8 % (Bujok et al. 2015).

Tabulka 1. Základní vlastnosti vzorku jádra z vrtu DB P-106
Table 1. Main characteristics of the core sample from the DB P-106 borehole

Borehole	Vertical depth (m)	Stratigraphy	Lithology
DB P-106	1656.1–1656.35	Middle Badenian	Medium-grained calcareous sandstone

Litostratigrafické členění sedimentárního sledu středně bádenské sedimentární výplně vídeňské pánve můžeme považovat za poměrně pestré. Nejspodnější část těchto sedimentů je obvykle spojována s lagunárními žilkovskými vrstvami s bazálními klastiky. Svrchní část pak tvoří převážně pelitické sedimenty zóny aglutinací, oddělené od podložního souvrství komplexem pískovců labského horizontu (Nehyba 2015). Jiříček (2002) vyčleňuje v rámci středního badenu spodní levárské písky, střední žilkovské pestré jíly a svrchní labské písky (zóna spodních aglutinací) a nadložní lithotamníové vápence a pelity (zóna svrchních aglutinací).

Z hydrogeologického hlediska se velká mocnost výplně vídeňské pánve projevuje výraznými rysy vertikální hydrodynamické a hydrochemické zonálnosti. V mělkých částech vytvářejí kolektory vídeňské pánve spolu s kvartérními kolektory, především fluvialními sedimenty, zvodněné subsystémy, pro které je charakteristické relativně rychlé proudění podzemní vody. Ve větších hloubkách je proudění podzemních vod ovlivněno zmenšováním propustnosti kolektorů s hloubkou a existencí zlomů, podél nichž často docházelo k značným vertikálním pohybům. Při styku litologicky odlišných sedimentů tak dochází k možnému omezení kolektorů nepropustnými hranicemi, takže podzemní voda až stagnuje, jak dokládají výskyt silně mineralizovaných solanek typu Na-Cl. Vzhledem k strukturním poměrům a litologickému vývoji byly ve vídeňské pánvi vytvořeny vhodné podmínky pro nahromadění kapalných a plyných uhlovodíků. Pasti uhlovodíků mají většinou ráz elevací, ve kterých jsou horniny kolektorů izolovány nepropustným nadložím a zlomy (Krásný et al. 2012).

Metodika

Mezi výzkumné metody, které byly vybrány k charakterizaci vlivu vstřikování CO₂ na změny v horninovém prostředí ve studované oblasti, patřilo shromažďování dat, kontrola kvality vzorků jádra, chemická analýza roztoků a laboratorní experimenty. Laboratorní experimenty byly prováděny v reakční komoře. Tyto metody jsou založeny na petrofyzikálních, mineralogických a hydrogeologických charakteristikách porézního prostředí, chemické analýze kapalin, hodnotách tlaku a teploty ložiska a kinetických parametrech.

RTG difrakční analýza, analýza skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) a experimenty ve vysokotlaké reakční komoře byly provedeny na Katedře geologického inženýrství VŠB – Technické univerzity Ostrava. Chemické analýzy reakčních roztoků provedla Katedra environmentálního inženýrství VŠB – Technické univerzity Ostrava.

RTG difrakční analýza a stanovení pórovitosti

Mineralogické složení vzorků hornin bylo stanoveno prostřednictvím RTG difrakční analýzy pomocí práškového difraktometru Bruker AXS D8 θ-θ v Bragg-Brentano parafookální geometrii s použitím vlnové délky CoKα ($\lambda = 1,7903 \text{ \AA}$, $U = 34 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$). Pro účely této práce byla pórovitost stanovena pomocí plynové porozimetrie (automatický permeametr Coreval 700, Vinci Technologies, Francie) (Bujok et al. 2015). Vzorky hornin byly analyzovány před laboratorními experimenty v reakční komoře a po následných experimentálních intervalech.

SEM skenovací elektronová mikroskopie

Mineralogická a petrofyzikální charakteristika vzorků hornin byla provedena pomocí skenovacího elektronového mikroskopu FEI Quanta 650 FEG, vybaveného analyzátoři WDX, EDX a EBSD. FEI Quanta 650 FEG je univerzální skenovací elektronový mikroskop (SEM), určený pro vysoké rozlišení obrazu a mikroanalýzu široké škály vzorků, včetně vodivých, nevodivých a hydratovaných.

Reakční komora

Experimentální část výzkumu byla provedena ve speciálně navržené vysokotlaké reakční komoře, aby bylo možné simulovat podmínky v podzemním rezervoáru. Dvě nezávislé nerezové komory (vnitřní průměr 141 mm, délka 368 mm) jsou umístěny v tlakové válcové komoře (vnější průměr 169 mm, délka 955 mm). Komoře je uzavřena uzavěří DN150 PN160, které jsou zevnitř potaženy inertní bariérovou vrstvou CO₂ pro potlačení chemických reakcí a zvenku potaženy vrstvou pro minimalizaci koroze. K ohřevu reaktoru byla použita vnější cívka a řízený oscilační pohyb (dvakrát denně) byl zajištěn pomocí kývavého systému, který simuloval dynamické geohydrodynamické procesy.

Testy byly prováděny při tlaku 160 bar a teplotě 53 °C, což odpovídá podmínkám v hloubce 1600 m. Jako reakční médium byla použita demineralizovaná voda. Vzorky hornin byly uchovávány v komorách po dobu 14, 60, 120 a 180 dnů v kontaktu s reakčním roztokem, aby bylo možné provést analýzu interakcí mezi vodou, horninou a CO₂ v rámci různých časových intervalů.

Chemická analýza roztoků

Ve vybraných časových intervalech mezi jednotlivými experimenty byly analyzovány vodné roztoky za účelem kvantifikace geochemických změn. Hlavní kationty a anionty byly stanoveny iontovou chromatografií a atomovou absorpční spektrometrií, stopové prvky pak pomocí ICP-OES.

Vstupní mineralogická charakteristika

Mineralogické složení studovaného vzorku horniny analyzovaného metodou RTG difrakce je uvedeno v tabulce 2. RTG difrakční analýza ukázala, že dominantním minerálem je křemen. Méně zastoupený je kalcit. Dolomit,

plagioklasy, draselné živce a jílové minerály se ve vzorku nacházejí pouze v jednotkách procent.

SEM analýza prokázala přítomnost halitu a zároveň potvrdila existenci procesu zvaného kaolinizace slídy (obr. 1).

Diskuse

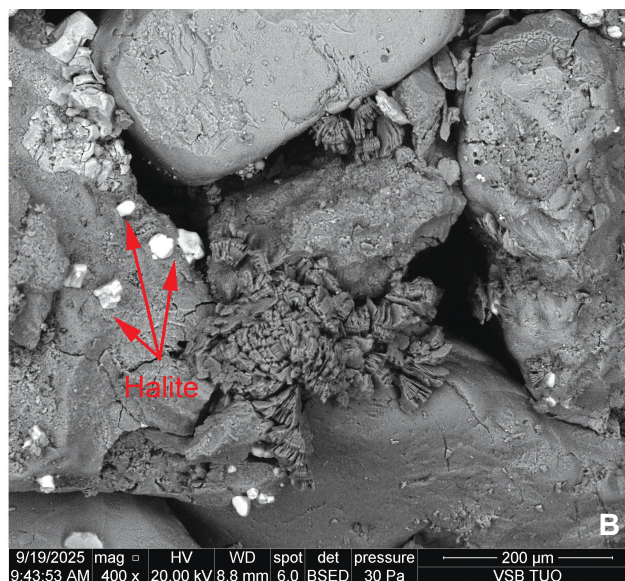
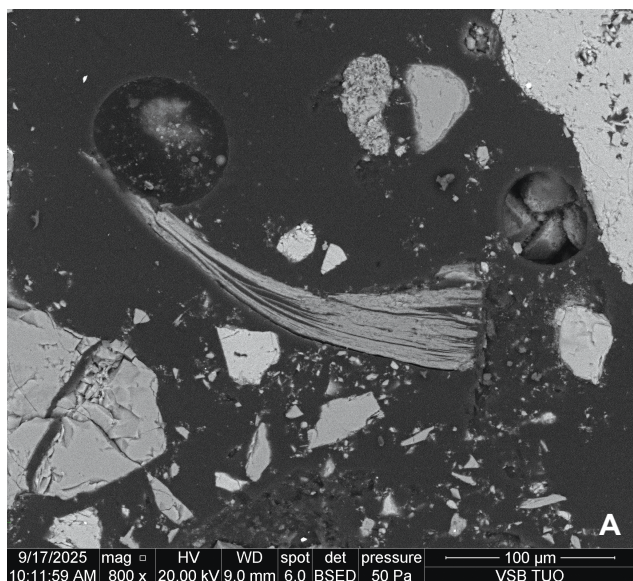
Experimenty poskytly rozsáhlý soubor dat definujících mineralogický vývoj pískovcových rezervoárových hornin po interakci s tekutinami bohatými na CO₂ za simulovaných podmínek skladování CO₂. Procesy probíhající v průběhu experimentálních fází byly monitorovány XRD analýzou pevných vzorků a hydrochemickým popisem reagujících roztoků po 14, 60, 120 a 180 dnech. Výsledky naznačují dynamickou vazbu mezi rozpouštěním a srážením minerálů, které ovlivňují reaktivitu ložiska a chování při skladování CO₂. Chemický popis reakčních roztoků je uveden v tabulce 3.

Mineralogické změny pozorované ve vzorcích hornin odebraných z vrtu DB P-106 lze vyhodnotit pomocí dat z RTG difrakční analýzy uvedených v tabulce 4. Tyto změny se vyvíjely postupně v průběhu laboratorních experimentů prováděných v reakční komoře, kde interakce hornin a tekutin simulovaly podmínky pod povrchem.

Tabulka 2. Mineralogické složení studovaného vzorku horniny (vysvětlivky: Q – křemen, Mu – muskovit, Calc – kalcit, Dol – dolomit, Ka – kaolinit, Ort – ortoklas)

Table 2. Mineralogical composition of the studied rock sample (Explanations: Q – quartz, Mu – muscovite, Calc – calcite, Dol – dolomite, Ka – kaolinite, Ort – orthoclase)

Borehole	Unit	Q	Mu	Calc	Dol	Alb	Ka	Ort
DB P-106	wt %	75.55	0.24	11.97	2.06	4.64	2.62	2.93
	vol. %	75.71	0.23	11.72	1.91	4.72	2.68	3.04



Obr. 1. SEM analýza původního vzorku horniny DB P-106. A – kaolinizace slídy, B – zrna halitu.

Fig. 1. SEM analysis of the original rock sample DB P-106. A – mica kaolinization, B – halite grains.

Tabulka 3. Chemická analýza reakčních roztoků před začátkem a po ukončení experimentů v reakční komoře
 Table 3. Chemical analysis of reaction solutions before and after the completion of laboratory experiments in the reaction chamber

Parameter	Unit	Input analysis	DB P-106	DB P-106	DB P-106	DB P-106
			(14 days)	(60 days)	(120 days)	(180 days)
pH	–	5.6	6.9	6.6	6.7	6.7
Conductivity	mS/cm	0.6	152	186	214	172
Na	mg/L	< 0.05	36.8	38.0	58.4	47.7
K	mg/L	0.0	9.37	26.9	18.5	17.3
Mg	mg/L	0.0	4.87	5.34	5.12	7.51
Ca	mg/L	0.0	390.0	554.0	473.0	493.0
Mn	mg/L	0.0	1.0	0.372	1.81	2.61
Fe	mg/L	0.0	14.0	104.0	132.0	60.9
Zn	mg/L	0.0	0.194	0.055	0.29	0.536
Cu	mg/L	0.0	0.09	0.039	0.045	0.071
Ni	mg/L	0.0	4.74	0.084	2.96	7.67
H ₂ CO ₃ *	mg/L	5.3	160.0	410.0	190.0	230.0
SO ₄	mg/L	0.0	86.0	34.0	32.0	45.0
Cl	mg/L	0.7	68.0	61.0	67.0	60.0
HCO ₃	mg/L	3.7	960.0	1380.0	1610.0	1130.0

V průběhu prvních 14 dnů došlo k prudkému vzestupu konduktivity, což svědčí o intenzivním uvolňování iontů z horniny. Výrazný nárůst chloridů a sodných kationtů potvrzuje rozpouštění halitu, který sice nebyl determinován pomocí RTG difrakční analýzy, ale byl identifikován pomocí SEM již v původním vzorku horniny a představuje krystalizaci solí z původních ložiskových solankových roztoků již při vysoušení vzorku horniny. Zvýšené koncentrace Ca²⁺ poukazují na rozpouštění kalcitu, což potvrzuje i RTG difrakční analýza. Prudký nárůst koncentrace hydrogenuhličitanů naznačuje reakci CO₂ s karbonáty. Obsah dolomitu během prvních 14 dnů vzrostl, což může naznačovat počáteční srážení sekundárního dolomitu. Dochází také k rozpouštění kaolinitu, jehož rozpouštění zrychluje

změna pH a dalších geochemických podmínek (injektáž CO₂, vystavení vysokým teplotám a tlakům). Ke srážení muskovitu může za daných termodynamických podmínek dojít při dostatečném množství draselných živců v roztoku.

Po 60 dnech koncentrace Na⁺ a Cl⁻ zůstávají vysoké, což potvrzuje pokračující rozpouštění halitu. K vyšším koncentracím sodných kationtů přispívá také rozpouštění se albit. Koncentrace vápenatých kationtů dosahují svého maxima, s čím souvisí pokračující proces rozpouštění kalcitu. S tímto procesem souvisí i nárůst koncentrace hydrogenuhličitanů. U dolomitu dochází k intenzivnímu sekundárnímu srážení, jelikož RTG difrakční analýza ukazuje jeho maximální hodnotu právě v této fázi. Zároveň pokračuje rozpouštění kaolinitu a srážení muskovitu.

Tabulka 4. Mineralogické změny ve vzorcích hornin z vrtu DB P-106 po 14, 60, 120 a 180 dnech injektáže CO₂
 Table 4. Mineralogical changes in the rock samples from DB P-106 borehole after 14, 60, 120 and 180 days of CO₂ injection

Time interval	0 days	14 days	60 days	120 days	180 days
(wt %)					
Dolomite	2.06	3.55	6.32	6.12	5.44
Orthoclase	2.93	1.12	0.77	1.86	1.69
Quartz	75.55	78.18	74.24	83.03	83.65
Calcite	11.97	10.55	10.26	3.56	3.33
Muscovite	0.24	1.59	1.99	1.52	1.73
Kaolinite	2.62	0.40	0.08	–	–
Halite	–	–	2.50	–	0.10
Albite	4.64	4.61	3.85	3.91	4.06

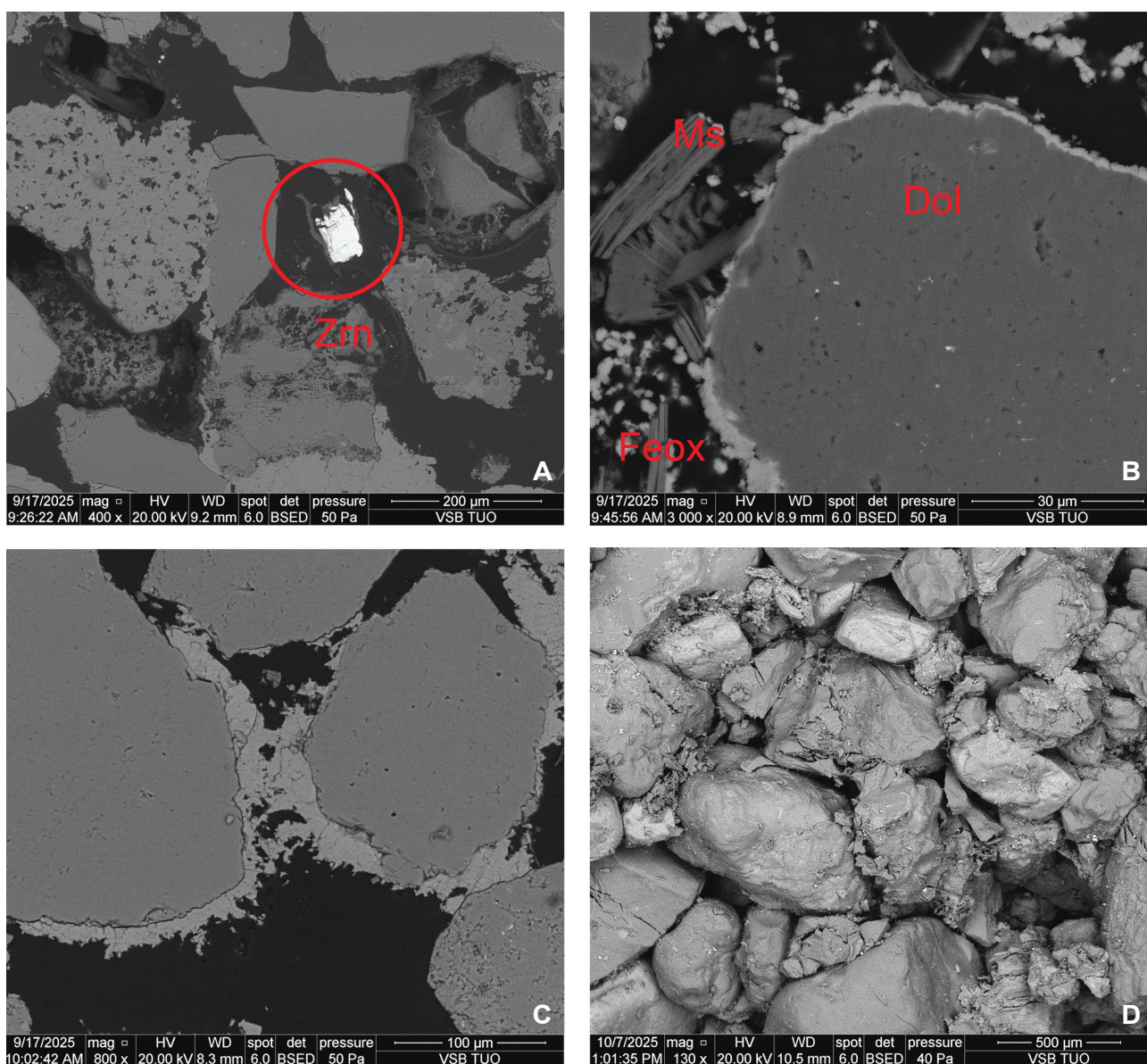
Po uplynutí 120denního intervalu můžeme sledovat pokračující nárůst koncentrace hydrogenuhlíčanů – vrchol karbonátové aktivity. Výsledky RTG difrakční analýzy ukazují stabilní hodnotu dolomitu v pevném vzorku. I v této fázi experimentu dochází k pokračujícímu rozpouštění kalcitu. Koncentrace sodných kationtů dosahují v této fázi svého maxima a stejně tak koncentrace chloridů mírně vzrostly. Během 120 dnů došlo k úplnému rozpuštění kaolinitu. Potvrdila se tak vysoká reaktivnost tohoto jílového minerálu v podmínkách potenciálního uložště.

V průběhu poslední fáze (180 dnů) dochází k mírnému poklesu koncentrace sodných a chloridových iontů. Klesající koncentrace Na⁺ mohou také souviset se srážením

albitu. Koncentrace Ca²⁺ a Mg²⁺ mírně vzrostly, což souvisí s pokračujícím rozpouštěním kalcitu, ale také s částečným rozpouštěním sekundárního dolomitu.

Obr. 2 ukazuje vybrané fotografie pořízené skenovacím elektronovým mikroskopem. SEM analýza byla provedena na vzorcích jádra DB P-106 po 14, 60, 120 a 180 dnech trvání experimentu v reakční komoře.

Po 14 dnech trvání experimentu (obr. 2A) můžeme ve vzorku pozorovat ostrohranná až subangulární zrna, zároveň těžké minerály (zirkon), které se však vyskytují v nízkých koncentracích. Obr. 2B nám poskytuje pohled na rekrystalizaci dolomitu po 60 dnech trvání experimentu. Dolomit po rekrystalizaci často vytváří kompaktní agregáty



Obr. 2. SEM analýza vzorku jádra DB P-106 po (A) 14 dnech – zrno zirkonu a ostrohranné úlomky, (B) 60 dnech – rekrystalizace dolomitu, muskovit, hydroxidy železa, (C) 120 dnech – rozpouštění kalcitu mezi křemennými zrny a (D) 180 dnech trvání laboratorního experimentu v reakční komoře – jsou patrná jen zaoblená zrna.

Fig. 2. SEM Analysis of the DB P-106 core sample DB P-106 after (A) 14 days – grain of zircon and sharp-edged fragments, (B) 60 days – dolomite recrystallization, muscovite, iron hydroxides, (C) 120 days – dissolution of calcite between quartz grains and (D) 180 days of the duration of the laboratory experiment in the reaction chamber, only rounded grains are visible.

bez vnitřní textury. Okrajová zóna odpovídá sekundární dolomitizaci. Na levé straně snímku můžeme vidět dlouhé, laminární útvary, typické pro muskovit. Po okrajích se objevují nepravidelné akumulace hydroxidů železa s vysokým BSE kontrastem. Obr. 2C znázorňuje rozpouštění kalcitu mezi křemennými zrny. Poslední snímek na obr. 2D zobrazuje pouze zaoblená zrna ve vzorku. Jedná se o nezpěvněný až slabě zpěvněný pískovec.

Závěr

Laboratorní experimenty interakcí CO₂–voda–hornina, které jsou zde představeny, přináší nové informace o geochemických a mineralogických reakcích pískovcových rezervoárů za relevantních podmínek hlubinného geologického ukládání. Hlavní výsledky experimentů shrnují následující odstavce.

Dynamika srážení a rozpouštění minerálů:

1. Kaolinit se během 120 dnů trvání experimentu úplně rozpustil, zatímco množství muskovitu v pevném vzorku během prvních 60 dnů mírně narůstalo a tato jeho koncentrace s mírnými oscilacemi vydržela až do konce experimentu v reakční komoře. Příčinou těchto oscilací může být transformace jílových minerálů, vliv koncentrace draselných kationtů v roztoku, ale také změny pH.
2. Kalcit se po celou dobu experimentu rozpouštěl. Postupnému rozpouštění kalcitu odpovídá i postupný pokles jeho obsahu identifikovaný RTG difrakční analýzou. Dolomit se v průběhu celého experimentu srážel za vzniku jeho sekundárních forem (např. rekrystalizace dolomitu na původních dolomitových zrnech na obr. 2B). Celkově se jedná o proces, kdy vlivem pokračující injektáže CO₂, změn teploty, tlaku a koncentrace solí (např. v důsledku vysychání v blízkosti vrtu) se mění geochemické podmínky a původní minerály (často nestabilní v novém, na CO₂ bohatém prostředí) se nejprve rozpouštějí a následně dochází k precipitaci (srážení) nových minerálů, které jsou v daném prostředí stabilnější. Zvýšená koncentrace vápníku, hořčíku a uhličitánových iontů v roztoku spolu s posunem pH směrem k vyšším hodnotám (k čemuž může dojít dále od injektážního vrtu nebo při specifických podmínkách) vytváří vhodné podmínky pro srážení dolomitu, který je stabilnější minerální fází v podmínkách zvýšeného tlaku a teploty, které panují v hlubokých úložištích. Tento proces může mít vliv na pórovitost a propustnost horniny v okolí vrtu.

Vývoj chemického složení roztoků:

Během experimentu došlo k výraznému nárůstu konduktivity, což odráží uvolňování iontů z horniny. Koncentrace sodných a chloridových iontů prudce vzrostly, což potvrzuje rozpouštění halitu a částečně albitu. Vápenaté a hořečnaté kationty byly uvolňovány rozpouštěním primárních minerálů kalcitu a dolomitu, přičemž dolomit se následně

po ustanovení nových geochemických podmínek v roztoku sekundárně srážel, rekrystalizoval. Znakem intenzivní karbonátové reakce s CO₂ je dramatický nárůst koncentrace hydrogenuhlíčanů z hodnoty 3,7 mg/l na 1610 mg/l.

Laboratorní simulace ukládání CO₂ do pískovcové struktury ukázala, že interakce hornina–roztok–plyn vedou k výrazným chemickým a mineralogickým změnám, které mohou mít vliv na pórovitost a propustnost kolektorové horniny potenciálního uložště, což může negativně ovlivnit schopnost sekvestrace CO₂ do této struktury. Tyto procesy je nutné zohlednit při hodnocení dlouhodobé stability a reaktivity uložště CO₂.

Poděkování. V práci jsou uvedeny výsledky výzkumu, který byl finančně podpořen Vysokou školou báňskou, Hornicko-geologickou fakultou, v rámci projektu SGS No. SP2025/074. Autoři by také rádi poděkovali RNDr. Juraji Franců, CSc., za cenné připomínky, které významně přispěly ke zvýšení kvality textu.

Literatura

- BENSON, S. B. – COLE, D. R. (2008): CO₂ sequestration in deep sedimentary formations. – *Elements* 4, 325–331.
- BUJOK, P. – KLEMPA, M. – PORZER, M. (2015): Výsledky nových petrofyzikálních měření – dílčí část. Příprava výzkumného pilotního projektu geologického ukládání CO₂ v České republice (REPP-CO2) č. NF-CZ08-OV-1-006-2015, výstup V1.17. Ostrava. – MS VŠB-Technická univerzita. Ostrava.
- GAUS, I. (2010): Role and impact of CO₂-rock interactions during CO₂ storage in sedimentary rocks. – *Int. J. Greenh. Gas Control* 4, 73–89.
- IZEG, O. – DEMIRAL, B. – BERTIN, H. – AKIN, S. (2008): CO₂ injection into saline carbonate aquifer formations I: Laboratory investigation. – *Transp. Porous Media* 72, 1–24.
- JIRÍČEK, R. (2002): Molassový vývoj alpsko-karpatské předhlubně a vídeňské pánve. – *Explor. Geophys., Remote Sens. Environ.* 9, 1–2, 1–179.
- KRÁSNÝ, J. – CÍSLEROVÁ, M. – ČURDA, S. – DATEL, J. – DVOŘÁK, J. – GRMELA, A. – HRKAL, Z. – KRÍŽ, H. – MARŠZALEK, H. – ŠANTRŮČEK, J. – ŠILAR, J. (2012): Podzemní vody České republiky: regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod. – *Čes. geol. služba*. Praha.
- NEHYBA, S. (2015): Litofaciální analýza a sekvenční stratigrafie rezervoáru a jeho nadloží – zpráva a datový soubor uložený v geodatabázi, připravený k využití ve 3D modelu. Příprava výzkumného pilotního projektu geologického ukládání CO₂ v České republice (REPP-CO2) č. NF-CZ08-OV-1-006-2015, výstup V1.9. – MS Masarykova univerzita. Brno.
- SAEEDI, A. – REZAEI, R. – EVANS, B. – CLENNELL, B. (2011): Multiphase flow behaviour during CO₂ geo-sequestration: Emphasis on the effect of cyclic CO₂-brine flooding. – *J. Pet. Sci. Eng.* 79, 65–85.
- SAYEGH, S. G. – KRAUSE, F. F. – GIRARD, M. (1990): Rock/fluid interactions of carbonated brines in a sandstone reservoir Pembina Cardium, Alberta, Canada. – *SPE Form. Eval.* 5, 399–405.