

**VYUŽITÍ OPUŠTĚNÝCH DŮLNÍCH DĚL A UZAVŘENÝCH HLUBINNÝCH  
UHELNÝCH DOLŮ PRO GEOSEKVESTRACI CO<sub>2</sub> SE ZAMĚŘENÍM NA  
ŘÍZENÍ VÝSTUPU METANU A ELIMINACI JEHO  
NEKONTROLOVATELNÝCH VÝSTUPŮ Z PODZEMÍ**

projekt ČBÚ č. 60-08

## 1. Úvod

Emise CO<sub>2</sub> vznikající lidskou činností – tzv. antropogenní emise CO<sub>2</sub> a jejich vzestupný trend, jsou považovány za vážné nebezpečí pro udržitelný vývoj lidstva a jejich omezování za nezbytnou podmínku ochrany životního prostředí. Oxid uhličitý je významný z plynů způsobujících skleníkový efekt, který se projevuje oteplováním zemského povrchu v důsledku změn toků tepelného záření mezi zemí a atmosférou.

V současnosti je ve světě rozpracováno několik projektů řešících teoreticky i poloprovozně ukládání CO<sub>2</sub> v různých geologických formacích. Jsou to především programy národní, např. v USA, Kanadě, Austrálii a Japonsku. V rámci Evropské unie byl např. řešen projekt RECOPOL představující ukládání oxidu uhličitého v uhelných slojích v Dolnoslezské pánvi. Hlavním cílem těchto projektů je zjištění, zda ukládání CO<sub>2</sub> v posuzovaných geologických formacích je ekonomicky únosné a ekologicky bezpečné. Pro Českou republiku připadají především následující možnosti ukládání:

### ***a) Ložiska ropy a zemního plynu***

Potenciálním úložným prostorem zde jsou vytěžená i aktivně produkující ložiska ropy a zemního plynu, ve kterých lze injektáží CO<sub>2</sub> (metoda EOR = Enhanced Oil Recovery) zlepšit výtěžnost zbytkové ropy o 10 až 15%. Ložiska ropy jsou výhodnou variantou, protože před vlastní těžbou byly vrstvy s uhlovodíky těsně uzavřeny v měřítku geologického času a obdobně může být „uzavřen“ i oxid uhličitý. Další výhodou je jejich vysoká prozkoumanost a tedy dostatek informací pro výběr vhodné lokality pro

<sup>1</sup> Institut geologického inženýrství, Hornicko – geologická fakulta, VŠB – Technická univerzita Ostrava; petr.bujok@vsb.cz, martin.klempa@vsb.cz, <sup>2</sup> Energie – stavební a báňská a.s.; nemec@enas.cz; <sup>3</sup> Eurogas a.s.; eurogas@ugn.cas.cz.

ukládání CO<sub>2</sub> je závislá na pórovém prostoru uvolněném po odtěžení ropy a dalším pórovém prostoru vyplněném vodou ležícím pod roponosnými vrstvami.

Vyčerpaná ložiska po těžbě zemního plynu představují vhodné pórové, horninové struktury jak pro sekvestraci CO<sub>2</sub>, tak pro zřizování podzemních zásobníků dováženého zemního plynu.

### ***b) Hluboce uložené uhelné sloje***

Netěžené nebo opuštěné uhelné sloje nabízejí další možnost ukládání, protože injektovaný CO<sub>2</sub> je přednostně adsorbován uhlím, zatímco původně adsorbovaný metan je jím vytlačěn. Tato metoda může být zvláště významná v případě metanem bohatých ložisek uhlí, kde výtěžnost metanu pro primární etapu těžby je okolo 20 – 60%. Vedle ukládací kapacity pro CO<sub>2</sub> tak ale vzniká potenciál pro zachycení desorbovaného metanu. Jeho dalším využitím lze významně snížit náklady na uložení CO<sub>2</sub>. Klíčovým faktorem při tomto způsobu uložení je propustnost (permeabilita) uhelné sloje.

## **2. Ložiska ropy a zemního plynu**

Prakticky každé ložisko ropy a zemního plynu je využitelné pro skladování tekutých odpadů, tedy i CO<sub>2</sub>, protože splňuje základní podmínku této činnosti, a tou je **hydrodynamická uzavřenost obzoru**. Při výběru injektážní zóny je však potřeba provést detailní geologický, hydrogeologický a chemický průzkum. Nedílnou součástí při výběru injektážní zóny je také zjištění a zhodnocení technického stavu injektážích vrtů, resp. sond, protože špatný technický stav injektážích vrtů může zapříčinit znehodnocení injektážní zóny, případně ohrozit okolní životní prostředí.

Po konzultacích s pracovníky firmy MND a.s. byla vytipována jako nejpříznivější struktura podle navržených kritérií i se zohledněním vzdáleností od zdroje CO<sub>2</sub> (uvažovaná elektrárna Hodonín) některá z **ker ložiska Podvorov (1)**. Kromě tohoto ložiska byla ze širšího výběru vhodných lokalit doporučena k dalšímu výzkumu rovněž ložiska **Koryčany a Ždánice**.

### 3. Ukládání CO<sub>2</sub> do hluboce uložených černouhelných slojí

Vhodnost ukládání (sekvestrace) CO<sub>2</sub> do uhelných slojí a uzavřených důlních děl je dána schopností jeho adsorpce do uhelné hmoty za současného vytěsňování slojového metanu. Vzhledem k této vlastnosti a následnému vytěsňování metanu je tento způsob sekvestrace CO<sub>2</sub> v současné době hodnocen jako perspektivní. Laboratorně bylo prokázáno, že k vytěsnění 1 objemové jednotky metanu se do uhelné hmoty adsorbují 2 – 3 objemové jednotky oxidu uhličitého.

Ukládání CO<sub>2</sub> do uhelných slojí a uzavřených důlních děl je podmíněno:

- geologickou charakteristikou potencionálního úložiště,
- fyzikálními vlastnostmi uhlí,
- fyzikálními vlastnostmi ukládaného oxidu uhličitého.

Základním předpokladem je také střední až vysoká propustnost uhelných slojí (uvádí se cca 1 – 5 mD). Tento požadavek může představovat bariéru komerčnímu nasazení v řadě světových uhelných revírů, pokud se nepodaří permeabilitu slojí zvýšit umělou stimulací (např. hydroštěpením).

Pro výběr vhodných lokalit (pro potřeby této analýzy jsme posuzovali jednotlivé dobývací prostory situované v české části Hornoslezské pánve) jsme zvolili 4 kritéria. Jedná se o riziko výstupu metanu, mocnost pokryvných útvarů, typologii pokryvných útvarů a porušenost karbonského masívu předchozí těžbou.

Další možnost ukládání nabízejí netěžené nebo opuštěné uhelné sloje, protože injektovaný CO<sub>2</sub> je přednostně adsorbován uhlím, zatímco původně adsorbovaný metan je jím vytlačěn. Metoda může být zvláště významná v případě metanem bohatých ložisek uhlí. Výtěžnost metanu pro primární etapu těžby je zde okolo 20 – 60% plynu. Mimo ukládací kapacity pro CO<sub>2</sub> tak vzniká potenciál pro zachycení desorbovaného metanu a jeho dalším využitím lze snížit náklady na uložení. Hlavním faktorem při tomto způsobu uložení je propustnost (permeabilita) uhelné sloje. Tato metoda ukládání je v současné době námětem řady projektů v USA, Kanadě, Austrálii a v rámci Evropské unie v polské části Hornoslezské pánve.

#### 4. Teoretické aspekty ukládání CO<sub>2</sub>

Nedílnou podmínkou sekvestrace oxidu uhličitého jsou jeho mechanické vlastnosti. Předpokládá se, že horizonty určené k sekvestraci oxidu uhličitého leží v hloubce větší než 800 m. Při teplotě a tlaku pro uvedenou hloubkovou úroveň mění CO<sub>2</sub> svou fázovou podobu a jeho měrná hmotnost je podobná hodnotě pro kapalinu, tj. tzv. fáze superkritické kapaliny. Tento přechod do superkritického stavu je dán hodnotou tlaku 7,38 MPa a teplotou 31,1°C.

V superkritickém stavu zabírá vtláčený CO<sub>2</sub> méně prostoru v pórech než ve své normální plynné fázi. V hloubkovém intervalu 600 – 800 m se zvyšuje hustota CO<sub>2</sub> v závislosti na hloubce. Od hloubky 1000 m dosahuje svého maxima a dále s rostoucí hloubkou se již nemění. Za normálních podmínek (teplota 25°C a tlak 0,1 MPa) má CO<sub>2</sub> hustotu 1,977 kg/m<sup>3</sup>. To znamená, že 1 tuna CO<sub>2</sub> zaujímá objem 526 m<sup>3</sup>. V hloubce 1000 m za teplotních a tlakových podmínek charakteristických pro tuto hloubku (35°C, 10 MPa) zabere 1 tuna CO<sub>2</sub> prostor 1,5 m<sup>3</sup> (hustota CO<sub>2</sub> má hodnotu 650 kg/m<sup>3</sup>).

Pro efektivní zatláčení by měla být hustota vtláčeného CO<sub>2</sub> v intervalu 600 kg/m<sup>3</sup> (30°C, 8 MPa) až 800 kg/m<sup>3</sup>.

Pro teoretickou představu, jakým způsobem se bude vtláčené CO<sub>2</sub> v zájmových horizontech chovat je využití matematického modelování procesu geochemické sekvestrace. To bylo provedeno spolupracovníkem Dr. Krzysztofem Labusem, pracovníkem Instytutu Geologii Stosowanej, Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej v Gliwicích. K modelování využívá simulátor: The Geochemit's Workbench 7 (GWB).

Výchozí podmínky uvedeného příkladu byly nastaveny na podmínky vrstev paralické série – zvodněné pískovce vrstev Dębowieckich, místo odběru vzorků vrt Kaczyce 2, Důl Morcinek (vrstevní teplota – 40 °C, vrstevní tlak po injektáži CO<sub>2</sub> – 5,34 MPa). Blíže viz lit. K. Labus, 2009.

Modelové simulování proběhlo ve dvou etapách. První etapa byla zaměřená na sledování změn probíhajících v horninovém prostředí na počátku procesu zatláčení

CO<sub>2</sub>, druhá hodnotila změny způsobené vlivem CO<sub>2</sub> po ukončení procesu jeho injektáže do propustných vrstev.

V modelu byl analyzován časový úsek o rozsahu 20 tis. let (obr. č. 1). V prvních třech letech po ukončení injektáže CO<sub>2</sub> dochází k průběžnému nárůstu pórovitosti horninového prostředí. Následně se tato hodnota stabilizuje na maximální úroveň a dále se nemění.

Presentované analýzy upozorňují na výrazné uskladňovací kapacity vodonosných kolektorů (zejména pískovců) vyskytujících se v nadloží i podloží uhelných slojí. Při aplikaci injektáže CO<sub>2</sub> do uhelných slojí za účelem vytěsnění metanu může docházet k neúplné sorpci CO<sub>2</sub> a k jeho unikání do okolního prostředí. Zmiňované zvodnělé kolektory by mohly být vhodným prostředím pro realizaci tzv. geochemické sekvestrace, kdy CO<sub>2</sub> nevyplňuje pouze pórový objem CO<sub>2</sub>, ale je i chemicky vázán na některé minerály horninového skeletu (obr. č. 2). Sekvestrovaná množství CO<sub>2</sub> mohou být až dvojnásobná.

Pro ověření teoretických předpokladů a výsledků modelového simulování byla pracovníky Institutu geologického inženýrství, Hornicko – geologické fakulty navržena a realizována laboratorní aparatura s pracovním označením RK – 1 (aparatura byla přihlášena k registraci jako průmyslový vzor).

#### **4.1 Výzkum teoretických předpokladů s využitím laboratorní aparatury RK - 1**

Laboratorní aparatura RK - 1 (reakční komora), obr. č. 3, je instalována v laboratořích Institutu geologického inženýrství (oddělení Aplikované geologie), Hornicko – geologické fakulty, VŠB - TU Ostrava. Aparatura je používána k dlouhodobým laboratorním zkouškám vlivu CO<sub>2</sub> na materiály používané pro vystrojení stvolu sond (stupačky, pažnice, pakry, filtry, ...) a pro sledování „chemické“ sekvestrace CO<sub>2</sub> v horninovém prostředí za p, T podmínek „in situ“ a za tzv. dynamických podmínek.

První dlouhodobý pokus (zároveň první svého druhu v ČR) byl zahájen dne 16. 3. 2010 v 11.45 h. V cele „A“ byly testovány vzorky z vrtného jádra vrtu Kaczyce 2, Důl Morcinek, vrstvy Dębowieckie (detrit) z hloubky 726,7 m.

V cele „B“ byly testovány dvě sady vzorků upravené z materiálů dodaných z MND a.s. – a to na vzorcích ze stupačky a ze stupačky svařené ze dvou trubek. Pokus probíhal v obou celách za konstantního tlaku 8,00 MPa a teploty 40 °C. Dynamické podmínky byly zabezpečeny výkyvným mechanismem.

První dlouhodobý pokus byl ukončen dne 2. 6. 2010 po 79 dnech sledování. Na obr. č. 4 je horninový vzorek vyjmutý z komory krátce po ukončení pokusu.

V současné době probíhá laboratorní výzkum ovlivněných horninových vzorků v laboratořích VŠB – TU Ostrava a na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně. Vzorky materiálů jsou analyzovány v laboratořích katedry Materiálového inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství VŠB – TU Ostrava.

## 5. Závěr

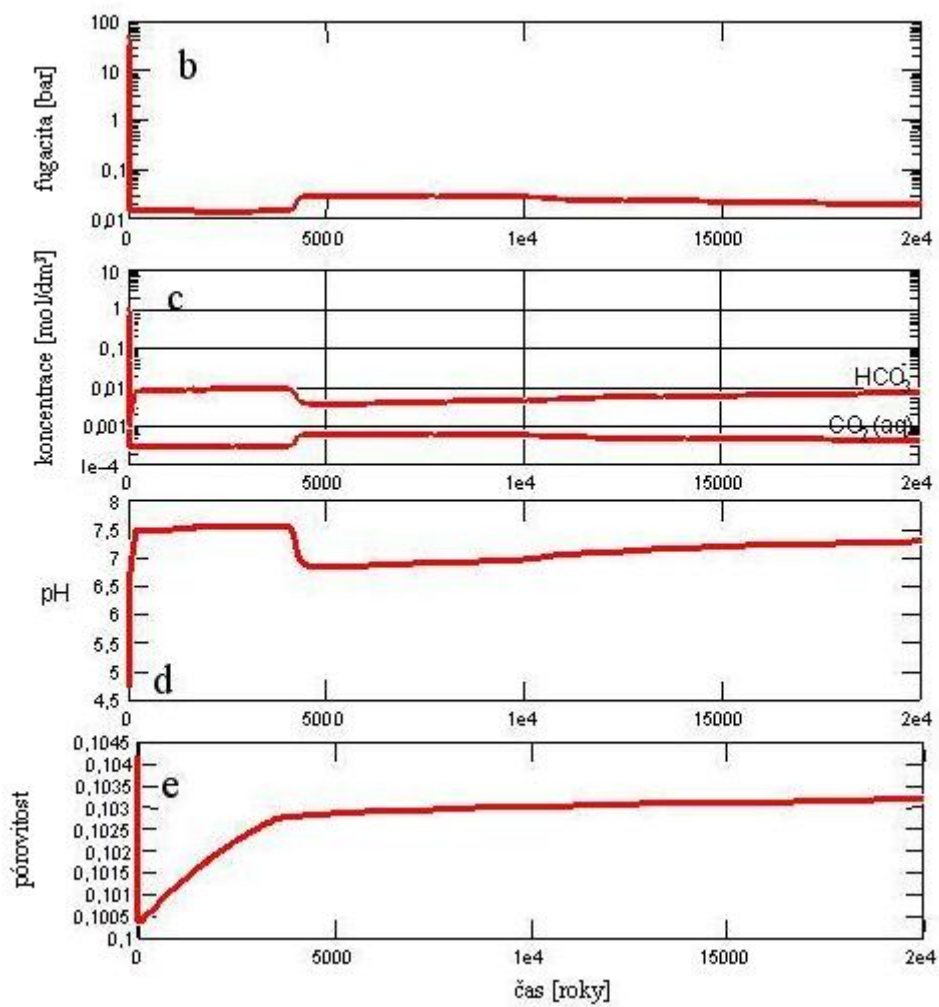
Z provedených analýz, laboratorních pokusů a konzultací s odborníky pro sekvestraci oxidu uhličitého do uhelných slojí, uzavřených důlních děl, vytěžených, popřípadě dotěžovaných ložisek uhlovodíků vyplývá:

- a. injektáž oxidu uhličitého by mělo probíhat v závislosti na hloubce a teplotě geologické formace kde se ukládání předpokládá, nejlépe pak v jeho kapalně fázi – jako superkritická kapalina.
- b. možnost a průběh sekvestrace bude do značné míry záviset na:
  - velikosti porózy a její struktury,
  - permeabilitě organické hmoty závislé na makromolekulární struktury, která v uhelné hmotě umožňuje transport plynů (CO<sub>2</sub>; CBM - coalbedmethan),
  - permeabilitě sloje, která je zajišťovaná systémem trhlin a frakcí,
  - stupni prouhelnění uhelné hmoty, která ovlivňuje adsorbční a desorbční pochody,
  - vlastnostech uhelné hmoty umožňující difúzi vytěšňovaného plynu.

Pro případný pilotní projekt geosekvestrace CO<sub>2</sub> navrhujeme lokalitu ložiska Ždánice.

## Základní použitá literatura:

- 1) Zpráva k 3. Kontrolnímu dni, Projekt č. 60-08 „Možnosti geosekvestrace CO<sub>2</sub> v podmínkách hlubinných dolů“. Závěrečná zpráva za etapu č. 2 – Vyhledávání vhodných geologických formací a důlních děl pro ukládání CO<sub>2</sub> v ČR. Kolektiv autorů, VŠB – TU Ostrava, červenec 2009.
- 2) Zpráva k 5. Kontrolnímu dni, Projekt č. 60-08 „Možnosti geosekvestrace CO<sub>2</sub> v podmínkách hlubinných dolů“. Dílčí zpráva za etapu č. 5 – Výzkum možností ovlivnění procesu trvalého ukládání CO<sub>2</sub> včetně vytěsňování CH<sub>4</sub>. Kolektiv autorů, VŠB – TU Ostrava, prosinec 2009.
- 3) Zpráva k 7. Kontrolnímu dni, Projekt č. 60-08 „Možnosti geosekvestrace CO<sub>2</sub> v podmínkách hlubinných dolů“. Dílčí zpráva za etapu č. 6 – Vypracování principů metod ukládání CO<sub>2</sub> do geologických formací a důlních děl v ČR. Kolektiv autorů, VŠB – TU Ostrava, červenec 2010.
- 4) Zpráva k 7. Kontrolnímu dni, Projekt č. 60-08 „Možnosti geosekvestrace CO<sub>2</sub> v podmínkách hlubinných dolů“. Dílčí zpráva za etapu č. 7 – Vypracovat zásady návrhu pilotního projektu geosekvestrace CO<sub>2</sub> v ČR. Kolektiv autorů, VŠB – TU Ostrava, červenec 2010.
- 5) Bujok, P. (2003): Vliv vrtného průzkumu, těžby a uskladňování kapalných a plyných uhlovodíků na životní prostředí. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada hornicko-geologická, Monografie 10, Ostrava 2003.
- 6) Firemní materiály (2000 – 2009): Baker Huges Incorporated, Downhole Products, Cameron, Weatherford International, Haliburton Energy Services, Schlumberger. Domposite Catalog.
- 7) Firemní materiály MND a.s., Hodonín; MND Servisní a.s., Lužice.
- 8) Kubiszová, A. (2008): Aplikace CO<sub>2</sub> pro zvýšení vytěžitelnosti ložisek s vysoce viskózní ropou. Diplomová práce, Ostrava 2008.
- 9) Labus, K.; Bujok, P. (2009): Abandoned Coal Mines – Source of Unconventional Forms of Energy & Space for CO<sub>2</sub> Geosequestration. 24<sup>th</sup> World Gas Conference, Reviewing the Strategies for Natural Gas, Argentina, 5 – 9 October.
- 10) Krevelen, D.W. Coal Science, Elsevier, 1957.
- 11) Essenhigh, R.H. Chemistry of Coal Utilization, Elliott, M.A.M.Y. 1981.
- 12) White, C.M. a kol.: Sequestration of Carbon Dioxide in Coal with Enhanced Coalbed Methane Recovery. Energy and Fuels 2005, 19, 659 – 724.
- 13) Šimek J.: Geologická sekvestrace + vymezení potencionálních úložišť v České republice; GIS-Geoindustry; 2005.



**obr. č. 1**

Změny probíhající po ukončení injektáže CO<sub>2</sub>. Hodnoty CO<sub>2</sub>:

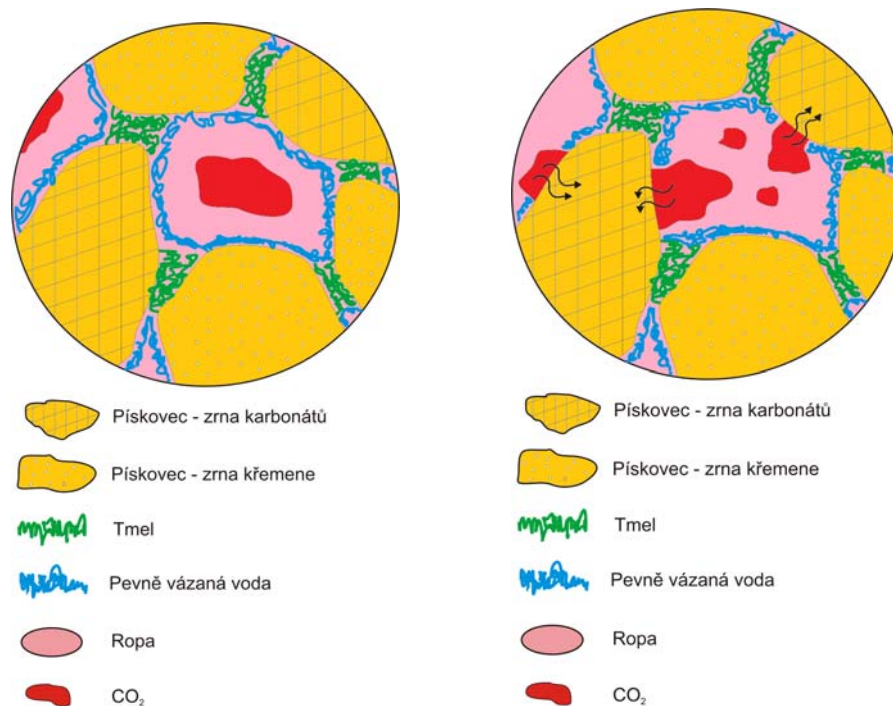
a – v krátkém časovém intervalu (do 5 let), b – v dlouhém časovém intervalu (do 20ti let),

c – změny koncentrací CO<sub>2</sub> (aq) a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, d – změna hodnoty pH, e – změny pórovitosti

horninového prostředí

(K. Labus, 2009)

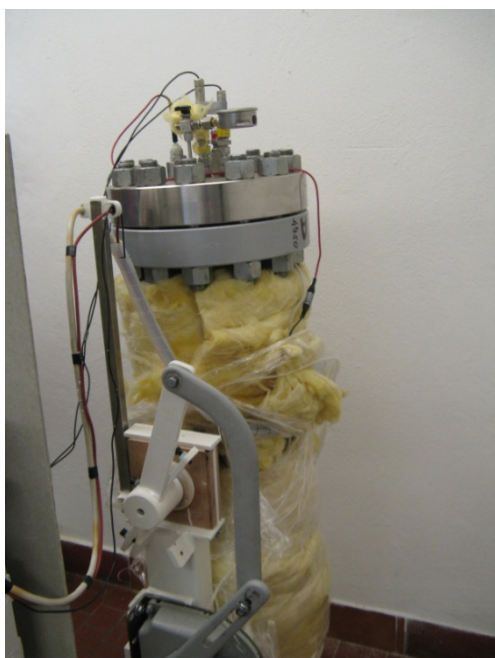




**obr. č. 2**

Schematické znázornění řezu kolektorskou horninou – pískovec (zvětšeno)

A – stav bez reakce CO<sub>2</sub> s karbonáty; B – reakce CO<sub>2</sub> s karbonáty



**obr. č. 3**

boční pohled na aparaturu RK – 1 po odstranění vnějšího tepelného krytu

(P. Bujok, M. Klempa, 2010, in 3)



**obr. č. 4**

horninový vzorek vyjmutý z cely „A“ krátce po ukončení pokusu

(P. Bujok, M. Klempa, 2010, in 3)