

Posouzení databáze dat se zaměřením na vyhodnocení závislosti obsahu CO₂ a CO na teplotě paliva

Ing. Vlastimil Moni, Ph.D.

Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., tř. Budovatelů 2830/3, Most; moni@vuhu.cz

Přijato: 31. 7. 2017, recenzováno: 14. a 16. 8. 2017

Abstrakt

V příspěvku je provedeno posouzení databáze dat pořízených v rámci výzkumného projektu s názvem „Výzkum možností predikce vzniku záparů a následného samovznícení hnědouhelných paliv“. V rámci řešení předmětného díla provedl zhotovitel podrobnou analýzu naměřených dat s odborným komentářem a shrnutí výsledků výzkumu se zaměřením na vyhodnocení závislosti obsahu CO₂ a CO na teplotě paliva.

Data assessment focused on the evaluation of the CO₂ and CO content in relation to the temperature of the fuel

The paper summarizes the assessment of data obtained in the frame of the research project entitled "Research of possibilities to predict the formation of self-heating and subsequent self-ignition of coal fuels". The author has carried out a detailed analysis of the measured data with expert comments and summarized the results of research with a focus on evaluation of the CO₂ and CO content in relation to the temperature of the fuel.

Bewertung der Datenbank der Daten mit Orientierung auf Auswertung der Abhängigkeit des CO₂ und CO - Gehaltes von der Temperatur des Brennstoffes

Im Beitrag wird die Datenbasis der Daten beurteilt, die im Rahmen des Forschungsprojektes unter dem Titel: „Forschung der Prädiktionsmöglichkeiten der Entstehung von Brühungen und anschließenden Selbstentzündungen der Braunkohlenbrennstoffen“ ermittelt wurden. Im Rahmen der Lösung des genannten Werkes hat der Ausfertiger eingehende Analyse der gemessenen Daten vorgenommen, mit einem fachlichen Kommentar und der Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, wobei die Abhängigkeit des CO₂ und CO-Gehaltes von der Brennstofftemperatur bewertet wurde.

Klíčová slova: samovznícení, hnědé uhlí, skládky, hodnocení náchylnosti k samovznícení.

Keywords: spontaneous combustion, brown coal, landfills, reviews susceptibility to spontaneous combustion.

1 Úvod

Výzkumný projekt č. TA01020351, řešený v rámci programu ALFA po dobu čtyř let 2011 až 2014, byl zaměřen na problematiku samovznícení hnědého uhlí a predikci jeho vývoje. Hlavním řešitelem projektu byl Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s. (VÚHU a.s.) a spoluřešitelem Hornicko-geologická fakulta Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava (HGF VŠB-TUO).

Hlavním cílem projektu bylo nalezení metody včasné predikce vzniku nevratného bodu stavu záparu hnědých uhlí ve skladovaných tělesech hnědouhelných paliv a pilířích těžebních společností, tak na straně velkoodběratelů (energetika), a to zejména z hlediska celoplošnosti, rychlosti a přesnosti lokalizace potenciálních míst nevratného stavu záparu směřujícímu k samovznícení.

2 Laboratorní rozborů indikačních plynů samovznícení [1]

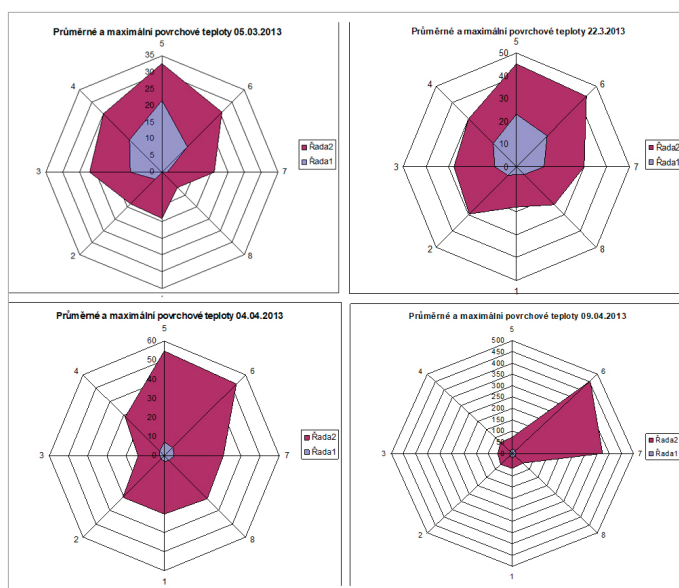
V zájmu zajištění co největší komplexnosti informací popisujících proces samovznícení hnědouhelné deponie byly v rámci uvedeného projektu TAČR realizovány odběry hnědouhelných vzorků z pokusných deponií a jejich základní analýzy a analýzy na plynové obrazy indikačních plynů samovznícení laboratorní

metodou TEPOX, včetně zpracování katalogu ověřených uhelných vzorků.

Metoda tepelné oxidace (TEPOX) je standardní metodou pro ověřování plynových obrazů indikačních plynů samovznícení uhlí. Metoda poskytuje informaci o vývinech uvolňovaných plynů při umělém zahřívání uhelné hmoty. Základem aparatury je horkovzdušná pec o výkonu 1 200 W řízena PC. Teplota vyhříváního prostoru pece a vnitřního prostoru reaktoru je měřena termočlánky typu K. Součástí aparatury je plynová linka pro měření koncentrací majoritních indikačních plynů. Uhlenný vzorek fragmentace 0,2–2,0 mm o hmotnosti 130 g je umístěn v reaktoru, kde je uměle vyhříván a filtrován vzduchem o objemovém průtoku 20 ml/min v teplotním intervalu 40–200 °C. V uvedeném teplotním rozsahu je uhelný vzorek postupně temperován na 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 a 200 °C. Ve stanovených teplotách jsou měřeny koncentrace majoritních indikačních plynů (CH₄, CO₂, CO, ΔO₂) a jsou odebrány plynové vzorky na chromatografickou analýzu minoritních indikačních plynů (H₂, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, C₃H₈, C₃H₆, nC₄H₁₀, isoC₄H₁₀).

3 Provozní měření teplot [4,5]

Jak již bylo popsáno výše, jedním ze základních úkolů předmětného projektu byl podrobný záznam vývoje vnitřní a povrchové

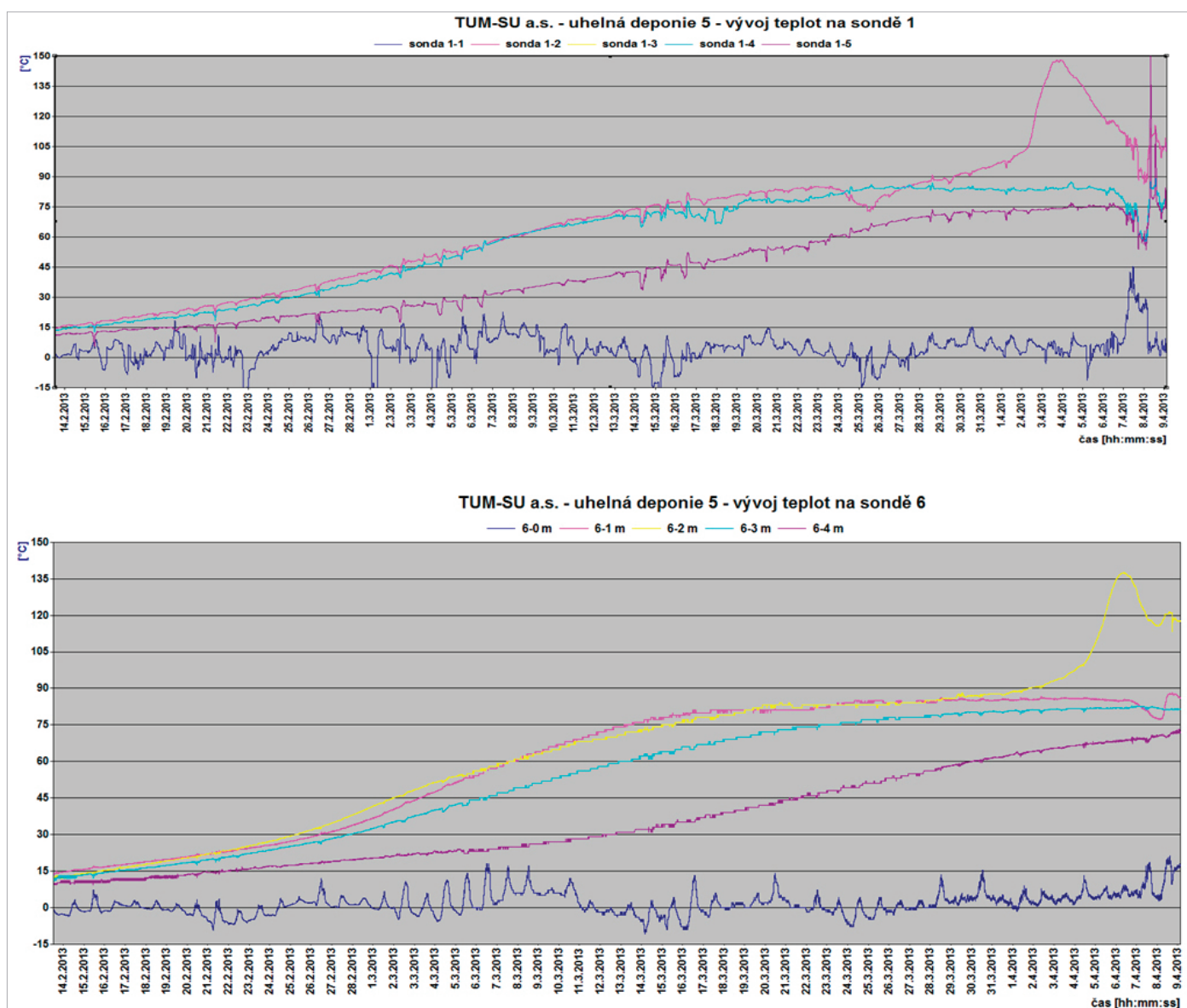


Obr 1: Ukázka vývoje povrchových teplot až do konečného zahoření (řada 1 - průměrné povrchové teploty, řada 2 - maximální povrchové teploty).

teploty deponované hnědouhelné masy (podrobný popis deponií a mnoho dalších zajímavých informací bylo již publikováno v samostatném článku v časopise Zpravodaj Hnědého uhlí). Takto vzniklá rozsáhlá databáze dat sloužila jako podklad pro popis vývoje záparu a následného samovznícení a umožnila porovnání všech důležitých i okrajových parametrů provázející vznik zahoření s aktuální teplotou, tzn. bylo tak umožněno definovat závislost vývoje všech indikačních plynů na teplotě.

3.1 Měření povrchových teplot

Pro účely měření povrchových teplot pláště hnědouhelného tělesa byla v rámci první etapy řešení projektu vytvořena a následně publikována „Metodika měření povrchových teplot hnědouhelné deponie“. Tato metodika popisuje základní postupy a podmínky měření při zjišťování aktuálních teplot povrchu obálky skladovaného tělesa hnědého uhlí pomocí termovizní aparatury. V předmětné metodice je uveden vlastní postup měření, včetně postupu vyhodnocení pořízených termogramů a návrhu zapisování zjištěných výsledků.



Obr 2: Ukázka vývoje vnitřních teplot až do konečného zahoření.

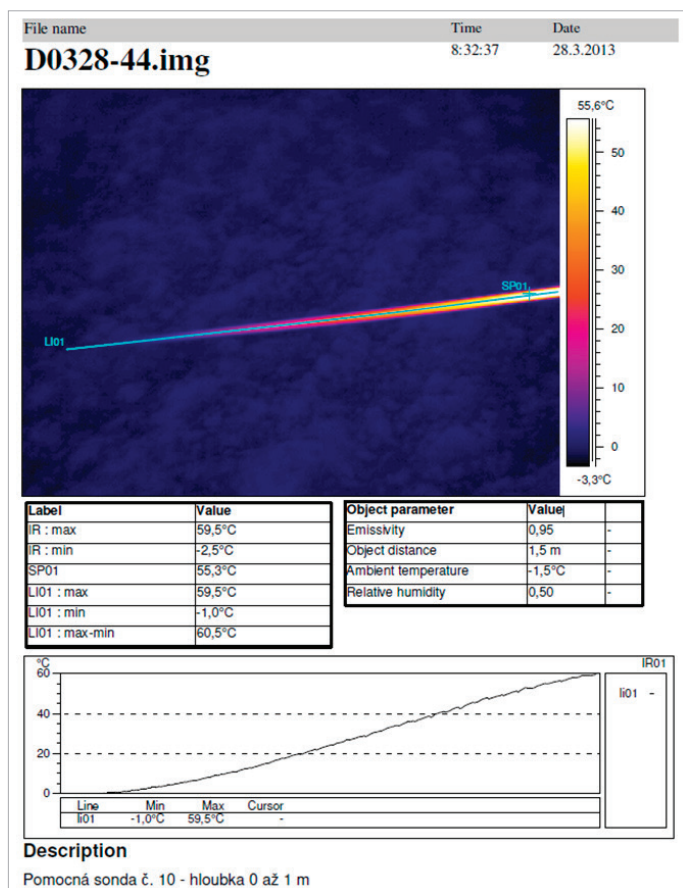
V uvedených grafech jsou znázorněny ukázky vývoje povrchové teploty pláště měřené hnědouhelné deponie. Ve zmíněných grafech je uvedena maximální teplota naměřená na povrchu pokusné hromady, která je odečtena z vybrané plochy pořízeného termogramu, a teplota průměrná, která je vypočtena z vyhodnoceného termogramu. Termogramy byly pořizovány vždy ze stejných osmi stanovišť umístěných kolem měřené hnědouhelné deponie tak, aby byla rovnoměrně změřena celá plocha pláště snímané masy hnědého uhlí a byla tak zachována určitá pravidla pro jednodušší pozdější srovnávání naměřených výsledků. V pozdější fázi dlouhodobého měření při výskytu tepelných anomálií na povrchu pokusné haldy byl dále proveden detailní termovizní záznam těchto míst. Tyto detailní termovizní záznamy jsou pak rovněž zahrnuty do výsledného souboru dat z konkrétního provedení měření. S těmito měřeními plně korespondují i plynoměrné odběry.

3.2 Měření vnitřní bodové teploty

Pro účely sledování vnitřní bodové teploty skladované hnědouhelné masy byly navrženy ocelové sondy. Na následujících obrázcích jsou ukázky naměřeného vývoje teplot v čase pořízené těmito měřicími sondami.

Současně s měřicími, resp. odběrovými sondami byla do hromady zapuštěna pouzdra, šachovitě rozmístěna ve dvou horizontech. Do pouzder se ukládaly měřicí sondy zhotovené z ocelové kulatiny.

Vnitřní teplota uhelné hmoty ohřívala pouzdro trvale uložené v hromadě uhlí, které následně předalo teplo sondě, a ta



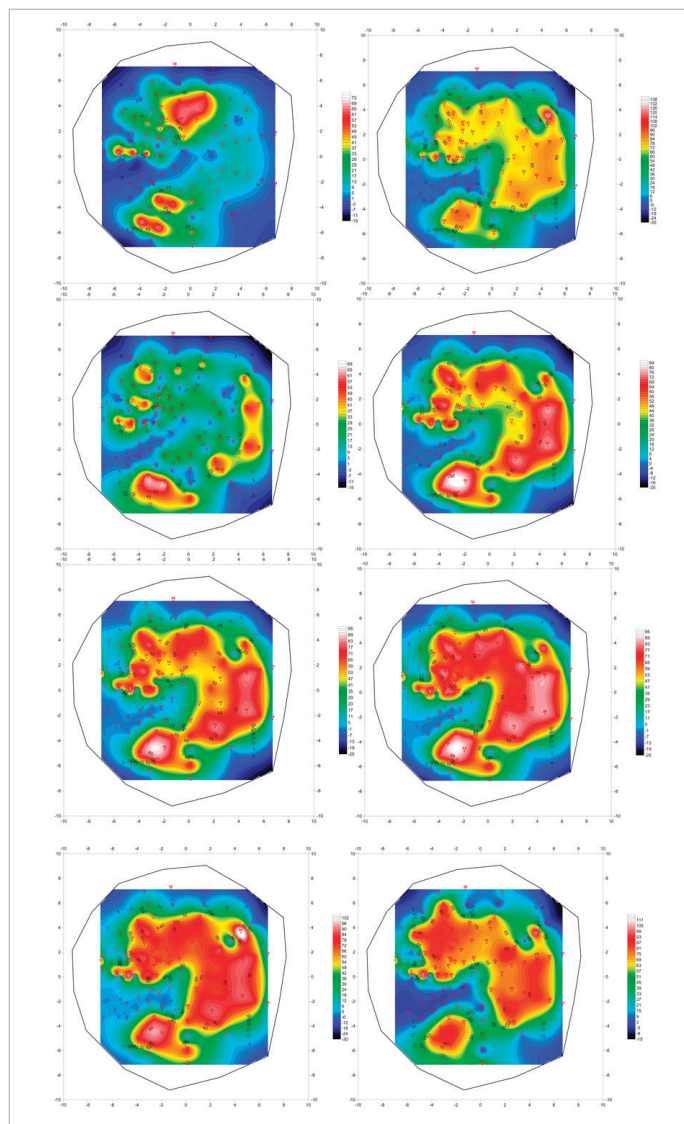
Obr. 3: Ukázka formuláře pro vyhodnocení rozložení teplot v přímce pomocných měřicích sond.

byla ihned po vytažení z pouzdra změřena termovizní kamerou. Pomocné sondy, tvořené vnějším pouzdem a vnitřním jádrem z kulatiny, byly určeny pro kontrolní, resp. srovnávací termovizní sledování vnitřní teploty v celém profilu 0 až 4 m hloubky pod povrchem sledované hromady.

Pro ověření úrovně a dynamiky vývoje teplot v čase a v prostoru sledovaného tělesa tak byla aplikována modifikovaná geofyzikální metoda geotermometrické vrtní varianty – karotáže. Základní, v provozních podmínkách již ověřený způsob spojitěho měření vnitřní teploty v celém profilu hloubky v nasypáném tělese hnědouhelné sypaniny tak využívá zarážecích ocelových sond.

Ukázka takto pořízeného záznamu z 2. až 3. metru pomocné sondy č. 3, vyhodnoceného v připraveném formuláři, je patrná z obrázku č. 3.

Z takto pořízené, setříděné a analyzované rozsáhlé databáze informací je možné graficky zobrazit rozložení a vývoj vnitřních teplot v místě a čase (viz následující obrázky č. 4, umožňující porovnání všech parametrů provázející vznik zahoření s aktuální teplotou).



Obr. 4: Ukázka rozložení a vývoj vnitřních teplot (tmavé odstíny - nižší teploty).

4 Výsledky měření [1,2,3]

V níže uvedeném textu budou stručně uvedeny souhrnné výsledky z vyhodnocení naměřených dat in situ sledovaných deponií (podrobný popis měření a mnoho dalších zajímavých informací bylo již publikováno v samostatných článcích v časopise Zpravodaj Hnědé uhlí). Je nutno zdůraznit, že se jedná o souhrnné výsledky a sumarizovány jsou závěry, které byly pozorovány na většině ze sledovaných deponií. V některých případech došlo k jistému anomálnímu chování deponie, které vybočovalo z vypočítaného chování ostatních deponií. U většiny ze sledovaných deponií byl průběh sledovaných plynů obdobný a je možné popsat následující souhrnné závěry:

Majoritně zastoupené indikační plyny samovznícení hnědého uhlí

Ihned po nasypání deponie byly analyzovány poměrně vysoké hodnoty koncentrací oxidů uhlíku, především CO, které postupem času klesaly. Tento trend zpravidla netrval déle než 21 dnů, kdy začalo docházet k postupnému nárůstu teplot v tělese deponie, což se projevilo pozvolným nárůstem koncentrací CO. Po překročení kritické teploty cca 70 °C začal být nárůst koncentrací CO strmější a strmý nárůst koncentrací CO pokračoval až do pokročilé fáze samovznícovacího procesu.

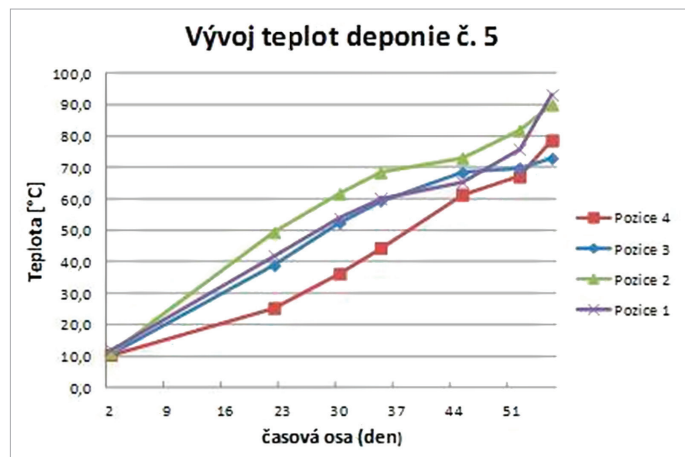
Koncentrace CO₂ zpravidla pozvolna plynule narůstaly od prvního měření (nasypání deponie). Pokles koncentrací CO₂ v prvotní fázi byl spíše výjimečný a nastal většinou u zimních deponií. Pozvolný nárůst koncentrací se zpravidla zpomalil při teplotách blízkých se kritické teplotě a po jejím překročení začaly koncentrace CO₂ zpravidla opět narůstat až do rozvinuté fáze samovznícovacího procesu.

Koncentrace CH₄ nebyly v prvotní fázi (po nasypání deponie) analyzátorem Dräger detekovány (<0,1 %). Měřitelné koncentrace metanu se začaly objevovat zpravidla až při vyšších teplotách, kdy byly koncentrace až v řádu procent potvrzeny i chromatografickým rozбором.

Koncentrace kyslíku měly zpravidla klesající trend, který byl do značné míry ovlivněn hloubkou pod povrchem, směrem a rychlostí větru a ročním obdobím (okolní teplotou). V zimním období, při výskytu „komínového efektu“, byly naměřeny vysoké koncentrace kyslíku (kolem 20%) i ve 4 metrech pod povrchem. Koncentrace kyslíku v tomto případě klesaly jen lokálně, poblíž ohnisek samovznícení a v koruně deponie.

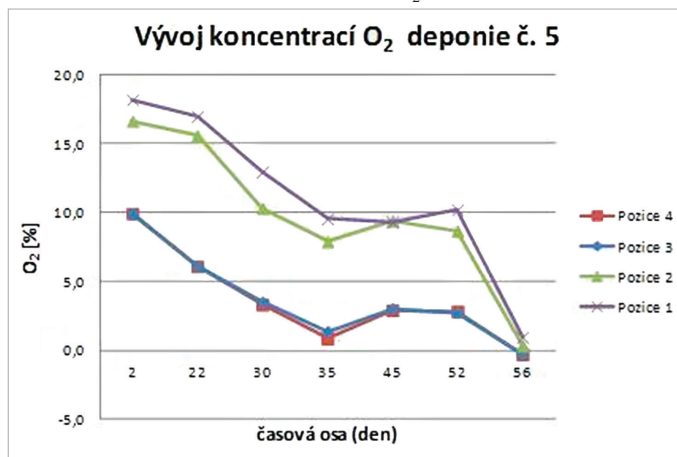
Charakteristický průběh uvolňování indikačních plynů v závislosti na teplotě je možné vidět na grafech 1 až 4. Na grafech jsou vyneseny průměrné hodnoty ze všech sond

Graf 1: Ukázka vývoje teplot na vybrané deponii č. 5.*

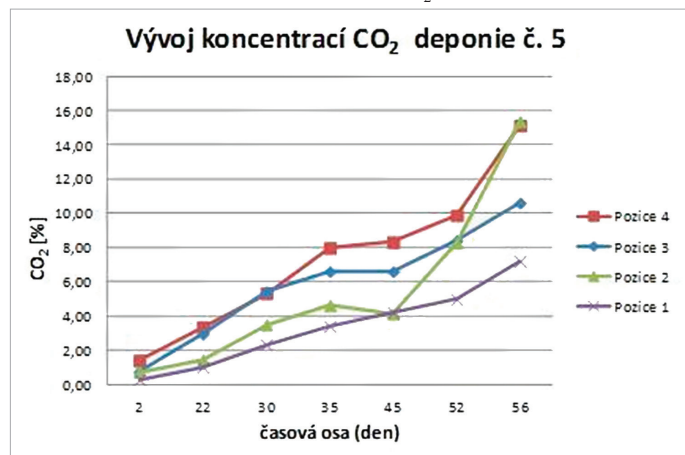


* pozice = odběrové místo směrem od povrchu dovnitř, tzn. pozice 1 - 1 m pod povrchem, pozice 2 - 2 m pod povrchem atd.

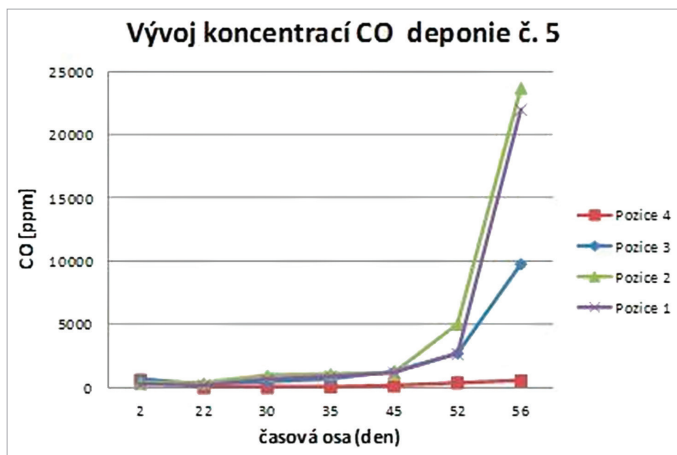
Graf 2: Ukázka vývoje koncentrací O₂ na vybrané deponii č. 5.



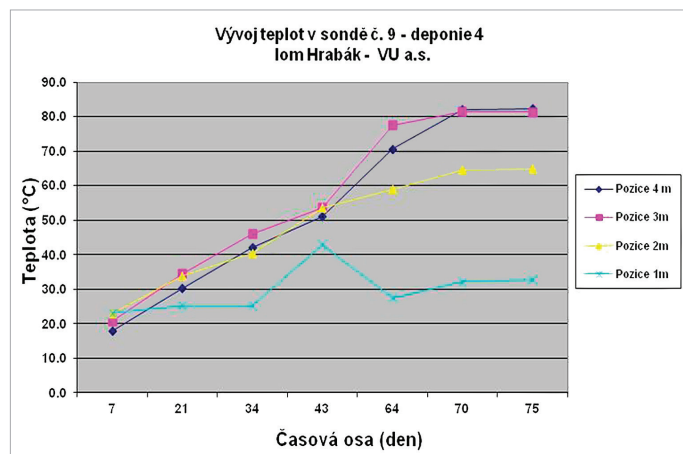
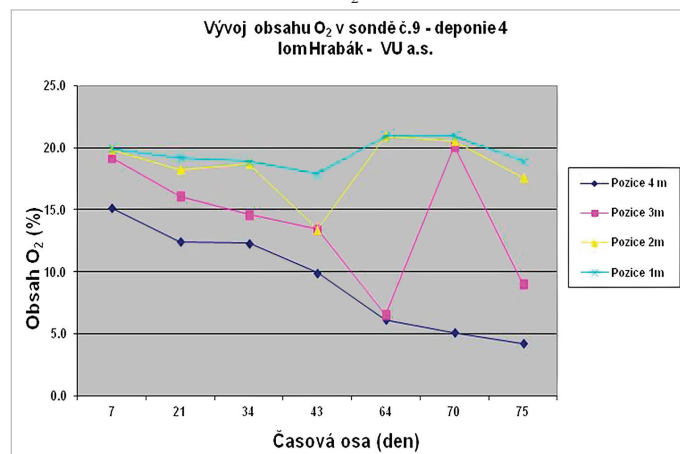
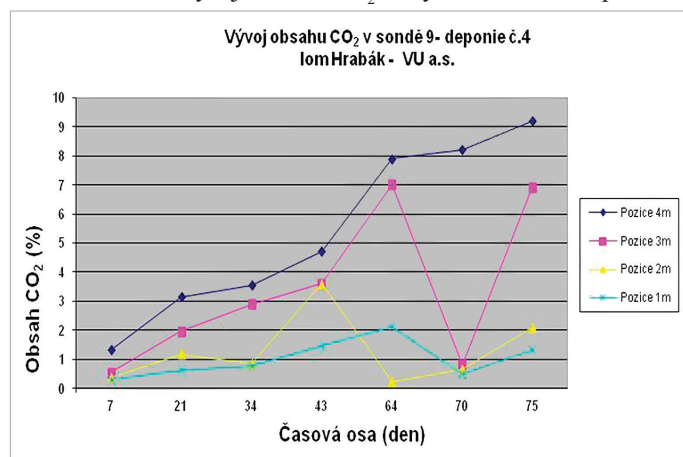
Graf 3: Ukázka vývoje koncentrací CO₂ na vybrané deponii č. 5.



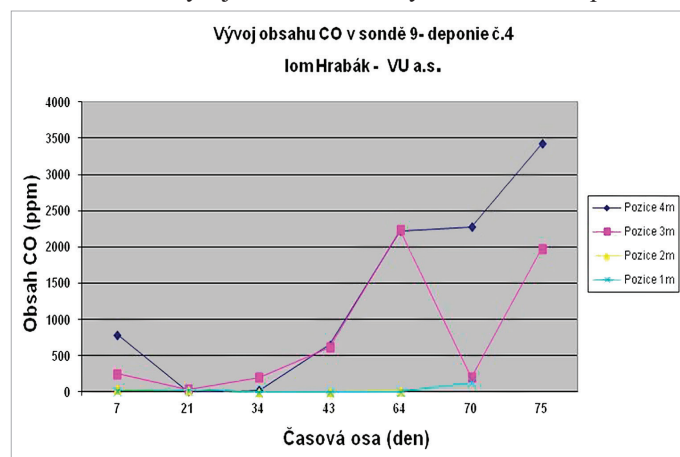
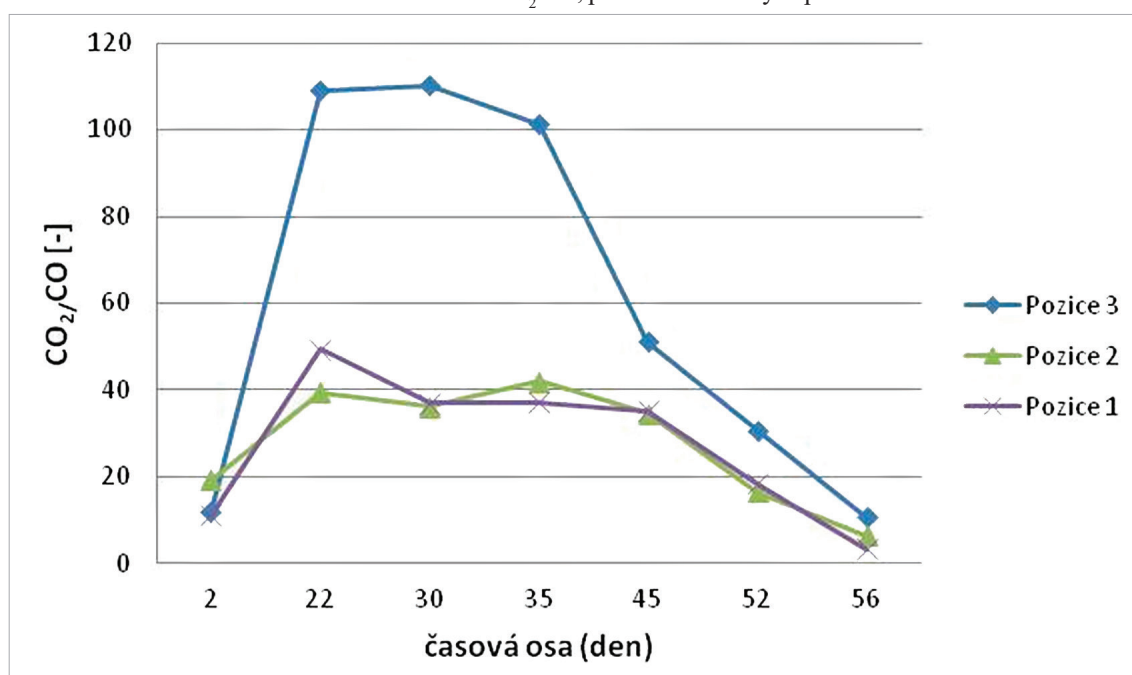
Graf 4: Ukázka vývoje koncentrací CO na vybrané deponii č. 5.



Graf 5: Ukázka vývoje teplot na vybrané sondě v deponii č. 4.

Graf 6: Ukázka vývoje obsahu O_2 na vybrané sondě v deponii č.Graf 7: Ukázka vývoje obsahu CO_2 na vybrané sondě v deponii č.

Graf 8: Ukázka vývoje obsahu CO na vybrané sondě v deponii č.

Graf 9: Binární ukazatel CO_2/CO , průměrné hodnoty deponie č. 5.

měřených na deponii č. 5. Toto vyhodnocení (zprůměrování hodnot ze všech sond) mohlo být provedeno, protože ohnisko samovznícení se postupně rozšířilo po celém obvodu deponie. U většiny ostatních deponií došlo zpravidla k vzniku lokálních ohnisek samovznícení (zpravidla na závětrné straně) a výše popsané charakteristické průběhy jsou pak patrné jen na sondách situovaných poblíž těchto ohnisek samovznícení.

Vzhledem ke skutečnosti, že všechna měření in situ realizovaná v rámci projektu byla do značné míry ovlivněna ředěním naměřených koncentrací větrem, doporučujeme pro odhad vývoje teploty používat některý z binárních ukazatelů (poměru plynů). Vlastní vliv „naředění“ naměřených koncentrací je patrný z grafů 5 až 9 (70. den měření foukal silný vítr – vliv zaznamenán do 3 m hloubky).

Pro odhad kritické teploty je možné doporučit sledovat průběh binárního ukazatele CO_2/CO . Absolutní hodnoty tohoto ukazatele se značně liší v závislosti na místě odběru (především hloubce), nicméně trend je ve většině případů obdobný a přibližně srovnatelný s laboratorním výzkumem. Při nižších hodnotách teploty byl trend rostoucí, při teplotách okolo kritické teploty se tento rostoucí trend ustálí a nad kritickou teplotou dochází k prudkému poklesu tohoto ukazatele (viz graf 9).

5 Závěr [1,4]

Na základě vyhodnocení značného množství pořízených dat (např. vnitřní teploty zahrnují téměř 3,5 miliardy hodnot z celkem 170 měřících míst), která byla pořízena při realizovaných polních dlouhodobých měřeních i laboratorních šetřeních na vzorcích uhlí a následně zpracována do přehledných tabulek a grafů, je možné učinit následující závěry:

- Nejvyšší teploty vznikají zpravidla v hloubkách 2 až 3 metry od povrchu skladované hnědouhelné masy; v letním období ve spodní hranici tohoto intervalu a v zimním období naopak v horní hranici (více od povrchu).
- V těchto hloubkách (2 až 3 m) postupně, téměř lineárně stoupají teploty až na hodnotu v intervalu 80-95°C. V letním období je nárůst teploty strmější a v zimním období naopak stoupá teplota pomaleji.
- Teploty od třetího metru od povrchu tělesa hnědého uhlí s přibývajícím hloubkou klesají.
- V určité fázi vývoje záparu dochází ke stagnaci teplot v hloubkách 2 až 3 metry a nastává zvyšování vnitřních teplot ve všech hloubkách, tzn. dochází k vyrovnání teplot v celém tělese na hodnoty (80-95°C), které doposud byly pouze v hloubkách 2 až 3 metry od povrchu skladované hnědouhelné masy.
- V závěrečné části vývoje procesu zahoření (v krátkém období před vlastním samovznícením uhelné hmoty) může docházet k „falešnému“ lokálnímu prudkému nárůstu vnitřní teploty (v několika případech až 150 °C, a to v hloubkách od 2 do 3,5 metrů) a následně, během následujících 24 hodin, ke stejnému rychlému poklesu vnitřní teploty zpravidla na původní hodnotu.
- K finálnímu zahoření dochází v okamžiku, kdy již došlo k vyrovnání teplot v celém tělese hnědouhelné deponie. Hodnota této vyrovnané teploty atakuje hodnotu 100 °C.

- Ložiska samovznícení se nacházejí nejčastěji při patě a při povrchu skladované hnědouhelné masy, a to zpravidla v místech, která ještě před 24 hodinami nevykazovala žádné povrchové anomálie teplot.
- K odhadu teploty ohniska samovznícení hnědého uhlí lze na základě obdržených laboratorních a provozních podkladů uvedených ve zkrácené formě výše a v celém znění uvedených v ročních zprávách projektu doporučit:
 - Grafy nárůstu koncentrací majoritních indikačních plynů
 - CO_2 - trvalý nárůst vývinu od 40 °C - s poklesem v intervalu 100-120 °C,
 - CO - trvalý nárůst vývinu od 40 °C - se stagnací v intervalu 80-100 °C.
 - Grahamova čísla
 - interval teploty 40-100 °C - narůstající trend ukazatele $\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2 = 0,15-0,30$,
 - interval teploty 100-200 °C - narůstající trend ukazatele $\text{CO}/\Delta\text{O}_2 = 0,015-0,12$.
 - Binární ukazatel „propylén/propan ($\text{C}_3\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$)“
 - interval teploty 80-180 °C - klesající trend z hodnoty 4 na hodnotu 1, následný vzestup.
 - Plynové obrazy TEPOX indikačních plynů - přehled uvolňovaných plynů.

Z provozních měření in situ je možné pro odhad teploty nad kritickou mezí 70°C doporučit sledování binárního ukazatele CO_2/CO , jenž má zpravidla při teplotách nad 70°C klesající trend.

Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci programu ALFA projektu č. TA01020351 za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím TA ČR a značné spolupráce partnerů z HGF VŠB-TUO, jejichž výsledků výzkumu bylo v článku použito.

Literatura

- [1] ADAMUS, A., ŠANCER, J., RUCKÝ, P., SNOPEK, L.: Odborná závěrečná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu.
- [2] ADAMUS, A., ŠANCER, J., RUCKÝ, P., VĚŽNÍKOVÁ, H., SNOPEK, L.: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013.
- [3] MONI, V.: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2014.
- [4] MONI, V.: Výzkum možností predikce vzniku záparů a následného samovznícení hnědouhelných paliv - závěrečná zpráva.
- [5] MONI, V., TARABA, B.: Laboratorní šetření významu základních parametrů ovlivňujících oxidaci hnědých uhlí. Zpravodaj Hnědé uhlí, č. 2 (2013), s. 17-24. ISSN 1213-1660