

# Hodnocení míry nebezpečí vzniku procesu samovznícení hnědého uhlí na skládkách

prof. Ing. Boleslav Taraba, CSc.<sup>1</sup>, Ing. Vlastimil Moni, Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita v Ostravě, boleslav.taraba@osu.cz

<sup>2</sup>Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most

Přijato: 15. 4. 2014, recenzováno: 15. a 20. 5. 2014

## Abstrakt

**Příspěvek podává shrnující informaci o navrženém způsobu hodnocení nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu na hnědouhelných skládkách prostřednictvím tzv. kritéria MHU. Číselná hodnota kritéria MHU se vyhodnocuje jako součet bodových zatížení jednotlivých ukazatelů (parametrů), které bezprostředně ovlivňují podmínky vzniku záparu in situ. V článku jsou jednotlivé ovlivňující parametry analyzovány a je upřesněn způsob stanovení příslušného bodového zatížení.**

## The evaluation of risk of the spontaneous combustion process development of brown coal stockpiles

The article summarizes the information about the method proposed for the evaluation of the risk of self-ignition process development on coal stockpiles using so-called MHU criterion. The numeric value of the MHU criterion is evaluated as the sum of the point loads of the individual parameters, which immediately affect the conditions for the development of self-ignition process in situ. The analysis of the individual influencing parameters is reported and the way for determining their point load is presented.

## Risikobewertung der Entstehung des Prozesses Selbstentzündung auf den Braunkohlelagerplätzen

Der Beitrag bietet eine zusammenfassende Information über die entworfene Art der Risikobewertung von Entstehung des Selbstentzündungsprozesses auf den Braunkohlelagerplätzen mithilfe des MHU-Kriteriums. Der Zahlenwert des MHU-Kriteriums wird als die Summe der Punkbelastungen einzelner Parameter bewertet, die die Bedingungen der Selbstentzündungsentstehung in-situ unmittelbar beeinflussen. Im Artikel werden einzelne beeinflussende Parameter analysiert und die Art der Bestimmung der jeweiligen Punkbelastung präzisiert.

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

**Keywords:** spontaneous combustion, brown coal, stockpiles, evaluation of risk to spontaneous combustion.

## 1 Základní přístup k hodnocení nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu na hnědouhelných skládkách (kritérium MHU)

Při návrhu způsobu hodnocení samovznícovacího procesu hnědého uhlí na skládkách (tzv. kritérium MHU) vycházíme z ČSN 441315 „Tuhá paliva – Skladování“ a jsou zúročeny zkušenosti z přípravy obdobného (bodového) „Hodnocení míry nebezpečí vzniku záparu v porubech“ dle kritéria MF, které se dnes používá pro doly OKR [1,2].

Způsob hodnocení vychází z bodového ocenění ukazatelů (parametrů), které bezprostředně ovlivňují nebezpečí vzniku záparu na skládkách a které jsou zjednodušeně rozděleny do následujících „skupin“ (faktorů):

- 1) Parametry uhlí (vnitřní faktory) - souvisejí s vlastnostmi uhelné hmoty. Pro účel hodnocení jsou tyto parametry označovány „U“.
- 2) Technologické parametry (skladovací faktory) - souvisejí s geometrií a uložením skládky. Pro účel hodnocení jsou tyto parametry označovány „T“.
- 3) Parametry prostředí (meteorologické faktory) - souvisejí s lokalizací skládky v daném prostředí. Pro účel hodnocení jsou tyto parametry označovány „P“.
- 4) Dodatečné parametry - souvisejí s opatřeními pro snížení nebezpečí vzniku záparu. Pro účel hodnocení jsou tyto parametry označovány „D“.

Uvedené skupiny jsou dále rozepsány na dílčí hodnocené ukazatele, které byly navrženy na základě zkušeností a znalostí o oxidačním (samovznícovacím) chování uhlí na skládkách.

U: Parametry uhlí (vnitřní faktory) související s vlastnostmi uhelné hmoty

- U1: Predispozice uhlí k samovznícení (oxireaktivita)
- U2: Obsah vlhkosti
- U3: Zrnitostní skladba
- U4: Historie uhlí před uskladněním

T: Technologické parametry (skladovací faktory) související s geometrií a uložením

- T1: Výška skládky (deponie)
- T2: Stupeň zhutnění
- T3: Úhel sklonu svahu
- T4: Podloží skládky
- T5: Roční období, kdy byla skládka založena
- T6: Průměrná doba uskladnění uhlí

P: Parametry prostředí (meteorologické faktory) související s lokalizací skládky v daném prostředí

- P1: Orientace skládky vůči (převládajícím) větrům
- P2: Chránění skládky před deštěm
- P3: Odstínění skládky před sluncem

D: Dodatečné parametry související s opatřeními pro snížení nebezpečí vzniku záparu

- D1: Zábрана proti přímým nárazům větrů na skládku
- D2: Monitorování stavu skládky
- D3: Ošetření uhlí inhibitorem

Výsledná hodnota kritéria MHU se pak získá sečtením bodového zatížení jednotlivých ukazatelů. Škála bodového hodnocení byla nastavena tak, aby kritickou hranicí byl (podobně jako v případě kritéria MF pro stěnové poruby [1,2]) počet 35 bodů. Přesáhne-li míra nebezpečí vzniku samovznícení po součtu všech bodovaných parametrů tuto maximální, kritickou hodnotu 35, je potřeba navrhnout technické opatření k jejímu snížení. Bodová ocenění jednotlivých ukazatelů se přitom opírají o zkušenosti a výsledky dřívějších šetření (včetně numerického modelování) a jsou přiblížena v následující části tohoto příspěvku.

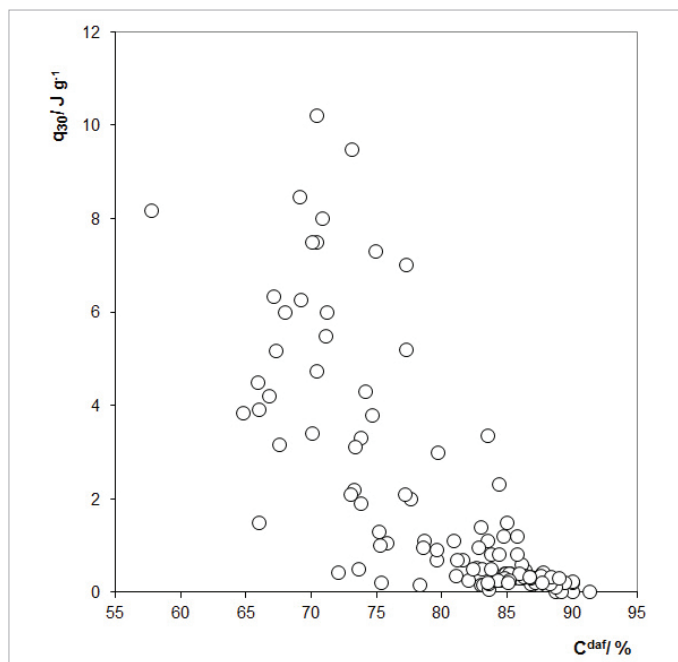
## 2 Analýza jednotlivých parametrů (faktorů) ovlivňujících vznik záparového procesu na skládkách

### U: Parametry uhlí (vnitřní faktory)

#### U1: Predispozice uhlí k samovznícení (oxireaktivita)

Reaktivita hnědých uhlí ke kyslíku je (obecně) daleko výraznější nežli uhlí černých. Tuto skutečnost jednoznačně doložily (mimo jiné) výsledky vlastních kalorimetrických měření metodou pulzní průtokové kalorimetrie (dále PPK) [3]. Metoda PPK umožňuje přímé stanovení tepla uvolněného chemickou reakcí kyslíku s uhlím, tzv. oxidačního tepla  $q_{30}$ , jehož hodnota je i základním ukazatelem pro posouzení samovzněcovací predispozice daného uhlí [3]. Hodnoty oxidačního tepla  $q_{30}$  číselně odpovídají teplu chemické interakce uvolněné jedním gramem čerstvého (dosud neoxidovaného [3]) uhlí během půlhodinového kontaktu s kyslíkem při teplotě 30 °C a normálním tlaku (index 30 v označení  $q_{30}$  tak má dva významy – jednak vyjadřuje teplotu měření [°C], jednak i dobu kontaktu uhlí s kyslíkem [min]). Rozměr oxidačního tepla  $q_{30}$  se uvádí ve W/kg uhlí respektive v J/g uhlí s vědomím, že dané teplo se uvolní za 30 minut.

Názorně je závislost oxireaktivity uhlí na jeho typu zobrazena na obrázku č. 1, kdy jako ukazatel prouhelnění je použita hodnota obsahu uhlíku v hořlavině uhlí  $C^{daf}$ . Z obrázku č. 1 je zcela zřejmá sestupná tendence hodnot oxidačního tepla  $q_{30}$  s nárůstem obsahu uhlíku  $C^{daf}$ , tedy se vzrůstajícím prouhelněním uhelné hmoty. Nejvyšší hodnota  $q_{30}$  ze všech dosud proměřovaných uhlí byla stanovena pro vzorek hnědého uhlí z dolu

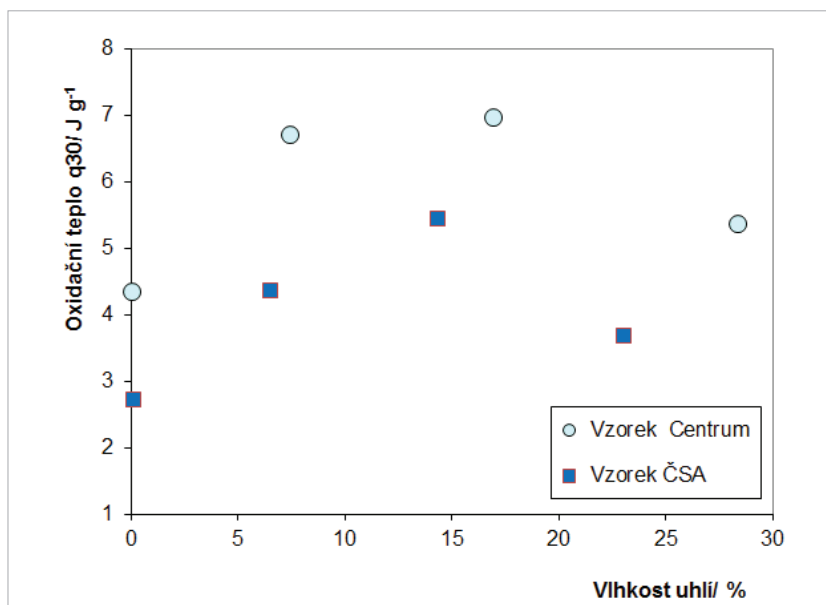


Obr. 1: Závislost oxidačního tepla na obsahu uhlíku v hořlavině uhlí.

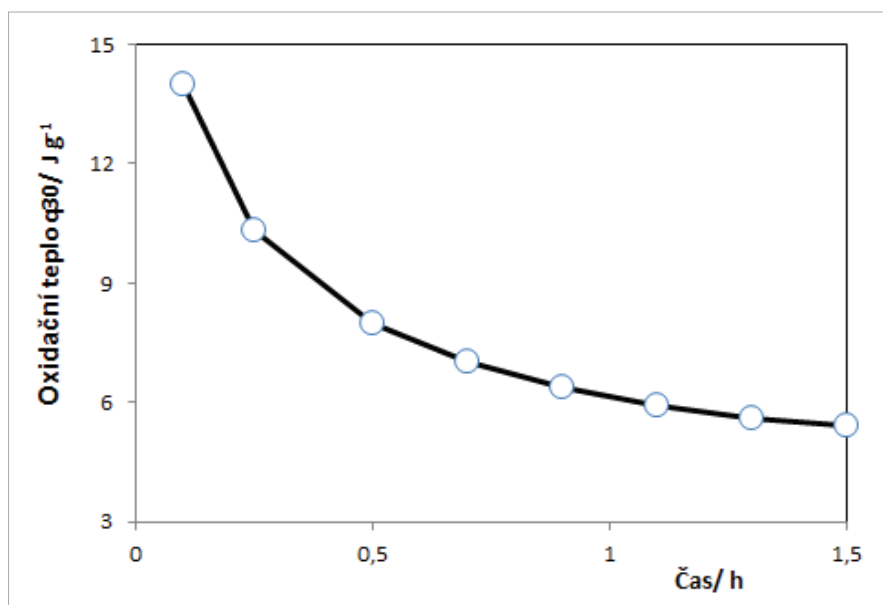
Handlová a také tureckého hnědého uhlí a činí cca 15 J/g = 8 W/kg (na obrázku č. 1 nejsou tyto hodnoty vyneseny z důvodu zvoleného měřítka).

Podle hodnoty oxidačního tepla  $q_{30}$  se uhlí zařazuje do jedné ze tří kategorií predispozice uhlí k samovzněcování - kategorie I (tj. vysoce reaktivní uhlí,  $q_{30}$  je větší než 4 W/kg), kategorie II (tj. reaktivní uhlí,  $q_{30}$  je v rozmezí 2 - 4 W/kg), kategorie III (tj. nereaktivní uhlí,  $q_{30}$  je menší než 2 W/kg). Mezní hodnoty  $q_{30}$  mezi jednotlivými kategoriemi byly stanoveny z proměření reprezentativní škály vzorků českých a slovenských hnědých uhlí.

Navržený způsob hodnocení nebezpečí vzniku samovzněcovacího procesu na skládkách pro tento ukazatel vychází ze základní logiky, že s rostoucí predispozicí uhlí k samovzněcování



Obr. 2: Závislost oxidačního tepla na obsahu vlhkosti hnědého uhlí.



Obr. 3: Závislost oxidačního tepla na době oxidace (vz. hnědého uhlí Handlová).

roste i nebezpečí vzniku záparového procesu na dané skládce. Pro hnědá uhlí spadající do kategorie I byla přidělena bodová hodnota 10, uhlí z kategorie II přísluší bodová hodnota 5 a uhlí z kategorie III pak je zatíženo 2 body. V případě, že predispozice skladovaného uhlí k samovznícení stanovena nebyla, počítá se se zatížením 10 body. V té souvislosti je potřeba ještě zdůraznit, že informaci o predispozici uhlí k samovznícení je možné získat nejen metodou PPK, ale (samozřejmě) i z šetření jinými laboratorními technikami (přehledně viz např. [3]).

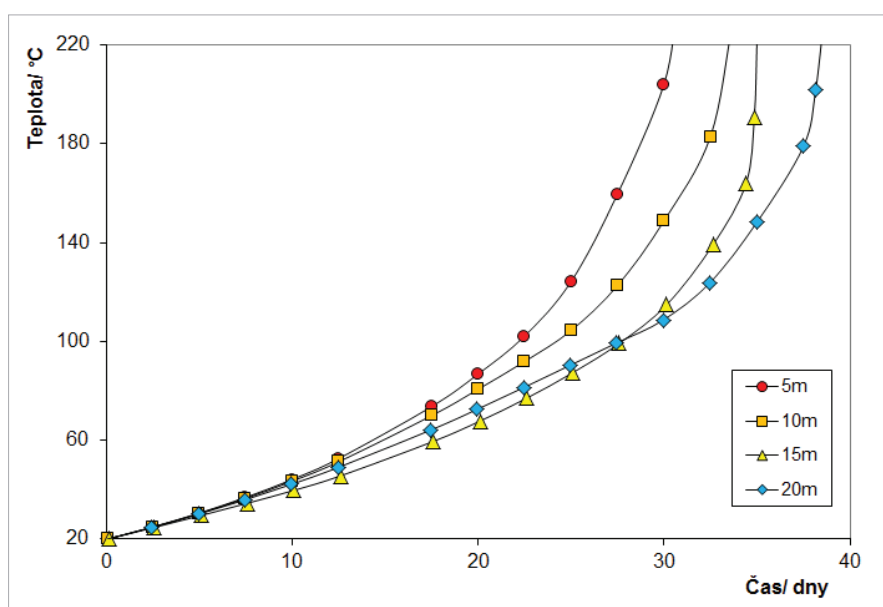
## U2: Obsah vlhkosti

Voda je základní komponentou, která nerozlučně doprovází přírodní uhlí. Obsahy vody v uhlí jsou přitom velice různé - od několika procent (černouhelné typy), přes úroveň okolo 30 % (hnědá uhlí), až po obsahy vlhkosti přesahující 50 % (lignity). Pokud se tedy hovoří o samovzněcování, oxidaci uhlí in situ, vlastně se tím

miní systém „uhlí – kyslík - voda“, kdy výsledné chování uhlí vůči kyslíku v sobě zahrnuje rovněž informaci o možném spolupůsobení přítomné vody. (Navození zcela suchého stavu uhlí je možné realizovat vlastně jen v laboratorních podmínkách.)

S ohledem na dominantní význam vlhkosti/vody na samovzněcovací proces hnědého uhlí je vlhkost zohledněna ve vícero hodnotících ukazatelích tohoto příspěvku; kromě U2 vystupuje ještě dále v ukazatelích U4, T5, resp. P2. V rámci ukazatele U2 se přitom hodnotí obsah vlhkosti v uhlí, které je na skládce deponováno a které bezprostředně vchází do kontaktu se vzdušným kyslíkem.

Vlivu vlhkosti uhlí na jeho oxireaktivitu (vyjádřené prostřednictvím oxidačních tepel  $q_{30}$ ) byla v rámci řešeného projektu TA ČR věnována pozornost v roce 2012, kdy byly proměřeny vzorky hnědých uhlí z dolů Centrum a ČSA [4]. Provedená měření potvrdila zásadní vliv vlhkosti na výslednou



Obr. 4: Vliv výšky skládky na dynamiku samovzněcovacího procesu deponovaného uhlí.

hodnotu oxidačního tepla, přičemž tento vliv ale evidentně není „monotónní“. Zatímco snížení vlhkosti uhlí z původní hodnoty (cca 28 %) na nižší obsahy vlhkosti vede nejprve k markantnímu nárůstu oxidačního tepla, další sušení vzorků způsobuje zřejmý pokles oxidačního tepla (viz obrázek č. 2).

Obrázek č. 2 tak názorně dokládá, že okolo hodnoty vlhkosti 15 % existuje stav uhlí ( $W_{max}$ ), kdy je oxidační proces nejintenzivnější. Takovýto charakter závislosti byl pozorován již dříve [5] a zřejmě nejvěrněji vystihuje chování chemicky interagujícího kyslíku s hnědouhelnými typy v celém rozsahu vlhkostí. Údaj  $W_{max}$ , kdy je oxidační rychlost maximální, bývá označován jako hygroskopický [6] nebo kritický [5] obsah vlhkosti. Jeho hodnotu zřejmě nelze považovat za konstantu, ale stojí za uvedení, že nalezená hodnota  $W_{max}$  okolo 15 % se shoduje s publikovanými údaji [3,5,6].

V kontextu s prokázanou závislostí intenzity oxidačního procesu hnědého uhlí na jeho vlhkosti navrhuje pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu uhlí na skládkách bodově rozlišit tři obsahy vlhkosti deponovaného uhlí.

|                                       |        |
|---------------------------------------|--------|
| Obsah vlhkosti je menší než 12 %      | 2 body |
| Obsah vlhkosti je v rozmezí 12 - 18 % | 3 body |
| Obsah vlhkosti je větší než 18 %      | 1 bod  |

### U3: Zrnitostní skladba

Je známo, že rozmělněné uhlí podléhá oxidaci daleko snáze nežli uhlí kusové. Obecně tedy platí, že čím je uhlí jemnější, tím více nebezpečí vzniku samovznícení na skládce roste. Někteří autoři ale prokázali, že to platí pouze do jisté, kritické zrnitosti. K podobnému závěru jsme v podstatě dospěli i na základě šetření hnědého uhlí z dolů ČSA a Centrum v rámci projektu TA ČR [4], kdy pro zrnitostní frakce s průměrem pod 1 mm byla nalezena de facto nezávislost hodnot oxidačního tepla  $q_{30}$  na průměru zrn uhlí. Prakticky to znamená, že rozměňování hnědého uhlí

s velikostí zrn 1 mm již nevede k odkrývání nového povrchu a tím ke zpřístupnění nových reakceschopných míst (kyslík je schopen, vlivem vysoké pórovitosti takovýchto uhlí, dosáhnout všech reakčních center již při zkouškách s nejhrubší zrnitostí frakcí daného vzorku). V té souvislosti je ale nutno zdůraznit, že použité experimentální zařízení neumožnilo proměřovat uhelné frakce s velikostí zrn větší než 1 mm [4].

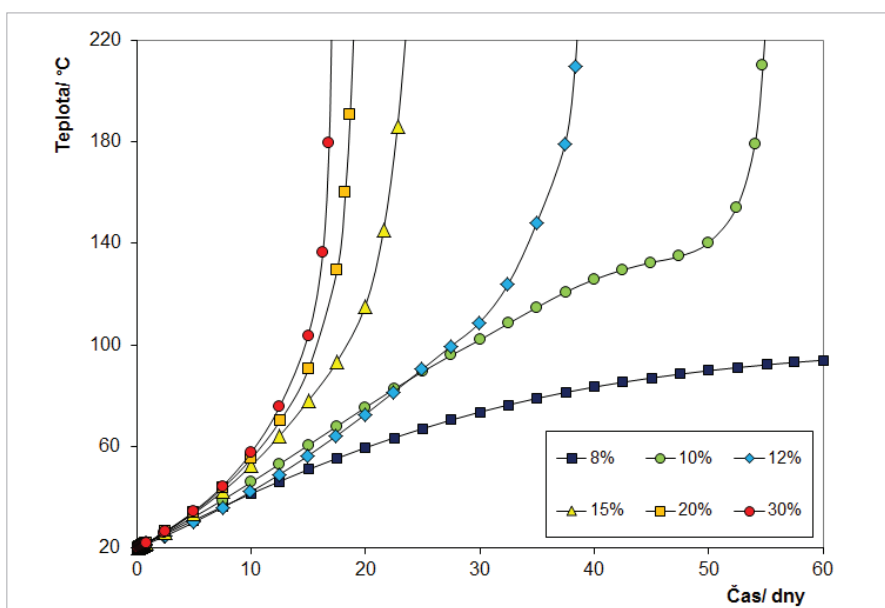
Z hlediska bezpečnosti hnědouhelné skládky vůči záparovému procesu tedy pokládáme za rozhodující přítomnost/množství uhelné drtě v dané skládce. Za uhelnou drť přitom doporučujeme pokládat hnědé uhlí s průměrem zrn pod 3 mm (mezí hodnota 3 mm - oproti experimentálně zjištěné 1 mm – je navržena z bezpečnostních důvodů).

V kontextu s výše uvedeným navrhuje pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu hnědého uhlí na skládkách následující bodové rozlišení:

|                                                                                                                                             |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Uhelná drť (= uhlí s průměrem pod 3 mm) je v zrnitostní skladbě skládkovaného uhlí rozložena rovnoměrně a je zastoupena více než 5 procenty | 3 body |
| Uhelná drť (= uhlí s průměrem pod 3 mm) je na skládce rozložena nerovnoměrně s vytvářením lokálního seskupení - „hnízda“                    | 3 body |
| Uhelná drť (= uhlí s průměrem pod 3 mm) je v zrnitostní skladbě skládkovaného uhlí rozložena rovnoměrně a je zastoupena méně než 5 procenty | 1 bod  |

### U4: Historie uhlí před uskladněním

Tento hodnocený parametr se snaží zohlednit dobu, která uplynula od vytěžení daného uhlí až po jeho uložení. Experimenty totiž jednoznačně prokázaly, že působením kyslíku na čerstvé uhelné vzorky dochází k markantnímu snižování tepla chemické interakce kyslíku. Názorně to dokumentuje obrázek č. 3 typickou závislostí, jak byla zjištěna pro čerstvý vzorek hnědého uhlí ze Slovenska (Handlová).



Obr. 5: Vliv zhuštění skládky na dynamiku samovznícovacího procesu deponovaného uhlí.

Z obrázku vyplývá, že počáteční výrazný pokles oxidačního tepla se zanedlouho utlumí a teplo se poté mění jen velice povlnně. To vypovídá o přiblížení se k určitému ustálenému, stacionárnímu stavu v chování kyslíku s uhlím, jak byl popsán i dříve [8]. Ani dlouhodobé působení kyslíku však nevede k nasycení všech reakčních míst na uhlí a k ukončení oxidačního procesu. Například u daného vzorku hnědého uhlí z Handlové byla po třicetidenní oxidaci vzduchem ještě nalezena hodnota  $q_{30} = 0,4$  J/g (když původní hodnota  $q_{30}$  pro čerstvé uhlí činila 14,5 J/g), a dokonce ani po třiletém skladování tohoto vzorku na vzduchu v laboratoři nebyla úroveň tepla  $q_{30}$  nulová, ale činila 0,07 J/g.

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu hnědého uhlí na skládkách navrhujeme bodově rozlišit „stáří“ skládkovaného uhlí dvěma bodovými úrovněmi:

|                                                                                  |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Na skládku je deponováno uhlí, které bylo vytěženo před dobou kratší než 1 týden | 3 body |
| Na skládku je deponováno uhlí, které bylo vytěženo před dobou delší než 1 týden  | 1 bod  |

## T: Technologické parametry (skladovací faktory)

### T1: Výška skládky (deponie)

Za účelem posouzení významu výšky skládky na samovznícovací proces uhlí byla provedena série počítačových simulací oxidace uhlí na skládce s konstantní mezerovitostí 12 % a sklonem svahu 40°, ale s výškou skládky měnící se v rozmezí 5-20 m [9]. Dosažené výsledky shrnuje obrázek č. 4, ze kterého lze vyčíst, že výška haldy vlastně nemá výraznější vliv na délku časových úseků pro dosažení bodu zvratu záparu do fáze nekontrolovatelného hoření. Ve všech modelovaných případech se tato doba pohybuje okolo  $34 \pm 4$  dnů.

Lze tak shrnout, že výška skládky ve sledovaném intervalu 5-20 m výrazněji neovlivňuje podmínky rozvoje samovznícovacího procesu deponovaného uhlí. Nutno ale zmínit, že modelované výšky 5-20 m překračují úroveň tzv. „minimální“ výšky skládky, jež se pokládá za nezbytnou pro rozvoj samovznícovacího procesu. Za takovouto „minimální“ výšku je označována hodnota 2 m [10], z ČSN 441315 pak lze vyčíst hodnotu 4 m.

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu hnědého uhlí na skládkách navrhujeme bodově zohlednit výšku uhelné haldy právě s ohledem na překročení „kritické“, minimální výšky haldy, za kterou zde v souladu s ČSN 44 1315 pokládáme 4 m:

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Výška skládky je menší než 4 m | 2 body |
| Výška skládky je větší než 4 m | 4 body |

### T2: Stupeň zhutnění (mezerovitosti, pórovitosti) skládky

Stupeň zhutnění (= mezerovitost, porozita) skládky představuje parametr, který naprosto zásadním způsobem determinuje podmínky pro vznik samovznícovacího procesu. Čím je mezerovitost větší, tím více se snižuje odpor proti pronikání vzduchu dovnitř skládky a obecně se tak zvyšuje nebezpečí vzniku záparu. Vlastní šetření vlivu zhutnění skládky na rozvoj oxidace deponovaného uhlí byla provedena s využitím matematického modelu

[9] pro hodnoty mezerovitosti mezizrného prostoru v rozmezí 8 - 30 %. Mezerovitost 8 % přitom odpovídá nejvyšší míře zhutnění skládky, které lze při dané zrnitosti uhlí technicky ještě dosáhnout. Výsledky z provedených simulací shrnuje obrázek č. 5 s časovými průběhy maximálních teplot pro jednotlivé hodnoty mezerovitosti.

Z obrázku č. 5 je zcela evidentní, že zhutňování skládky vede ke zpomalení dynamiky časového nárůstu teploty. Při zhutnění mezizrného prostoru na hodnotu mezerovitosti 8 % nedosáhla maximální teplota ve skladovaném uhlí ani po dvou měsících úrovně kritické teploty samovznícení (100 °C) a jako de facto v jediném simulovaném případě se tak podařilo vyhnout přechodu záparového procesu do fáze nekontrolovatelného hoření. Naopak, zhutnění skládky na mezerovitost 20 - 30 % se z tohoto pohledu ukázalo jako zcela nedostatečné, když bod zvratu záparu do jeho nekontrolovatelné fáze byl dosažen již za přibližně 2 týdny. V návaznosti na ČSN 441315 tak můžeme konstatovat, že zhutnění deponovaného uhlí evidentně potlačuje vznik záparového procesu v dané skládce.

Pro účely hodnocení míry nebezpečí vzniku samovznícení uhlí na skládkách navrhujeme bodově zohlednit stupeň zhutnění uhelné haldy (pouze) dvěma bodovými úrovněmi – nezhuťněná/zhutněná skládka. Při vlastní realizaci postupu zhutňování pak jednoznačně doporučujeme respektovat zásady uvedené v ČSN 441315:

|                                           |        |
|-------------------------------------------|--------|
| Skládka je volně sypaná, není hutněná     | 8 bodů |
| Skládka je hutněná v souladu s ČSN 441315 | 3 body |

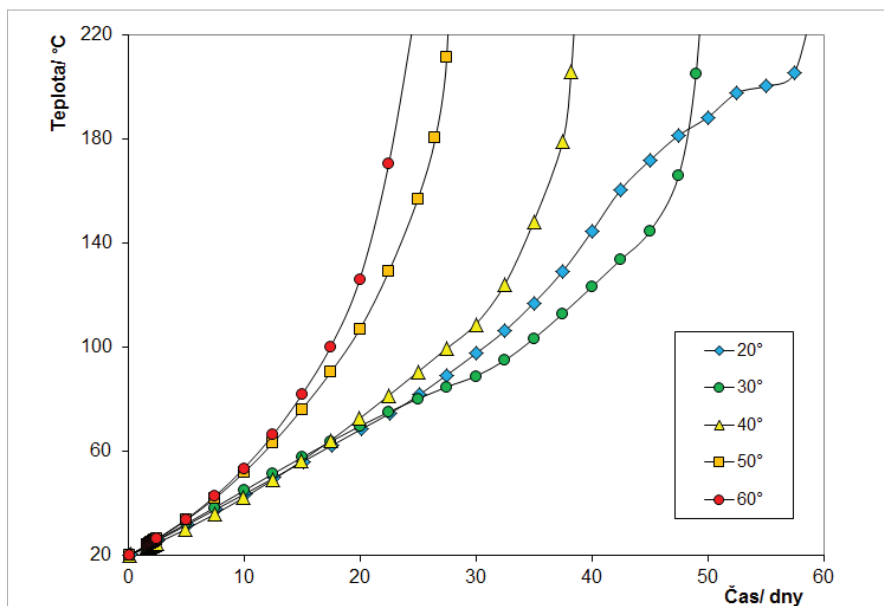
### T3: Úhel sklonu svahu skládky

Šetření vlivu úhlu sklonu bočních svahů skládky (v intervalu od 20 do 60°) byla provedena s využitím matematického modelu pro jednotnou mezerovitost skládky 12 % a pro konstantní výšku skládky 20 m. Výsledky názorně shrnuje obrázek č. 6, ze kterého je zřejmé, že zmenšující se sklon svahu skládky evidentně zpomaluje dynamiku teplotního nárůstu oxidujícího se uhlí. Snížením svahového úhlu skládky z 60° na 30° se doba dosažení bodu zvratu záparu do fáze nekontrolovatelného hoření zhruba zdvojnásobí.

Svým průběhem se ale vymyká pozvolná dynamika teplotního nárůstu zjištěná pro nejmenší modelovaný úhel 20° - bez typického zvratu teplotní křivky do fáze strmého vzrůstu, viz obrázek č. 6. V tomto kontextu lze spatřovat jistou návaznost na poznatek Agkuna s Essenhighem [10], že pro vznik záparu je kritický úhel svahování 26°, pod jehož hodnotou by k procesu samovznícování uhlí na dané skládce již nemělo dojít.

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícení uhlí na skládkách navrhujeme bodově zohlednit svahový úhel haldy dvěma bodovými úrovněmi, přičemž za rozhodující považujeme překročení „kritického“ svahového úhlu, za který pokládáme 20°:

|                                       |        |
|---------------------------------------|--------|
| Svahový úhel skládky je menší než 20° | 1 bod  |
| Svahový úhel skládky je větší než 20° | 2 body |



Obr. 6: Vliv sklonu svahu skládky na dynamiku samovzněcovacího procesu.

#### T4: Podloží skládky

Průběh samovzněcovacího procesu skládkovaného uhlí může ovlivňovat i charakter podloží založené deponie. V úvahu přitom připadají dva základní aspekty:

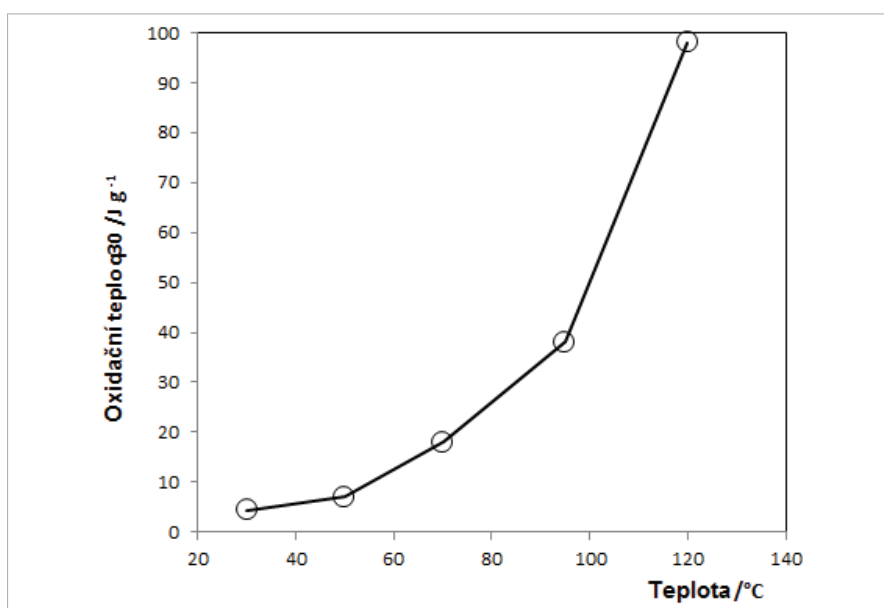
- vlastnosti skládky z hlediska (tepelně) izolačních vlastností;
- celistvost podloží s ohledem na existenci možných komunikačních cest pro přívod vzdušného kyslíku.

Vliv izolačních vlastností podloží na rozvoj procesu samovzněcování uhlí byl numericky modelován na VŠB TU Ostrava; názorně se podařilo doložit, že izolační charakter podloží přispívá k akumulaci oxidačního tepla a tedy k rozvoji záparového procesu.

Na význam celistvosti podloží můžeme poukázat na základě prakticky nabytých zkušeností. Z šetření příčin záparových

potíží na černouhelné skládce na lokalitě Lazy bylo totiž prokázáno, že ložisko procesu samovzněcování se zpravidla objevuje v blízkosti tektonického zlomu (poklesu), který prochází skrze těleso skládky, porušuje soudržnost deponovaného uhlí a evidentně tak představuje významný faktor pro usnadnění komunikace skládkovaného uhlí s okolním prostředím. V případě jiné zakládání skládky se negativně projevila snaha vytvořit pod budoucí skládkou rovný, pevný podklad s využitím betonových dílců obdélníkového tvaru. Po zatížení takto vytvořeného podkladu skládkovaným uhlím se totiž jednotlivé dílce postupně rozestoupily, a vzniklé mezery vytvořily nové, významné komunikační cesty pro přívod kyslíku. To vedlo následně ke vzniku záparových potíží, které nebyly pozorovány u skládky bez tohoto „betonového“ podloží.

Pro účely hodnocení míry nebezpečí vzniku samovznícení uhlí na skládkách navrhuje bodově zohlednit především



Obr. 7: Závislost oxidačního tepla na teplotě (vzorek hnědého uhlí „Centrum“).

celistvý charakter podloží haldy, který pokládáme za významnější aspekt nežli izolační vlastnosti podloží:

|                                                                                              |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Podloží skládky je pevné a nenarušený charakter si zachovává i po zatížení deponovaným uhlím | 1 bod  |
| Podloží skládky je narušené a existují komunikační cesty pro vzduch                          | 2 body |

#### T5: Roční období při založení skládky

Tímto ukazatelem se snažíme zohlednit vliv (počáteční) teploty skládkovaného uhlí na proces jeho samovznícování, když teplota je obecně pokládána za významný parametr ovlivňující oxidační reakci.

Pro kvantitativní postihnutí vlivu teploty na samovznícovací proces byla proměřena oxidační tepla vzorků hnědého uhlí (Centrum, Hrabák) od teploty 30 °C do teploty 120 °C [4]. Výsledky měření vzorku Centrum jsou graficky prezentovány na obrázku č. 7. Sledování podle očekávání prokázala jednoznačný nárůst tepelných vývinů s rostoucí teplotou.

Vliv teploty na chemický děj je nejčastěji analyzován pomocí známé Arrheniovy rovnice [3], jejíž význam spočívá především v možnosti vyčíslit hodnotu aktivační energie  $E$ , kterou si zjednodušeně představujeme jako energetickou bariéru, kterou je potřeba překonat, aby daná reakce mohla proběhnout (čím je tedy hodnota  $E$  nižší, tím by reakce měla probíhat snáze). Pro hnědé uhlí z lokality Centrum [4] byla stanovena hodnota aktivační energie  $E = 34$  kJ/mol, což znamená, že při zvýšení teploty o 15 °C se rychlost vývinu oxidačního tepla zhruba zdvojnásobí. Již z této základní úvahy je zřejmé, že v létě založená skládka s očekávanou teplotou uhlí 30 °C bude podléhat více než dvojnásobně intenzivnější oxidační reakci nežli uhlí na skládce založené v zimě, kdy lze očekávat teplotu uhlí okolo 10 °C. Takovýto poznatek byl plně potvrzen

i z dlouhodobých měření hnědouhelných deponií in situ [11], a z dané logiky vychází i návrh bodového hodnocení:

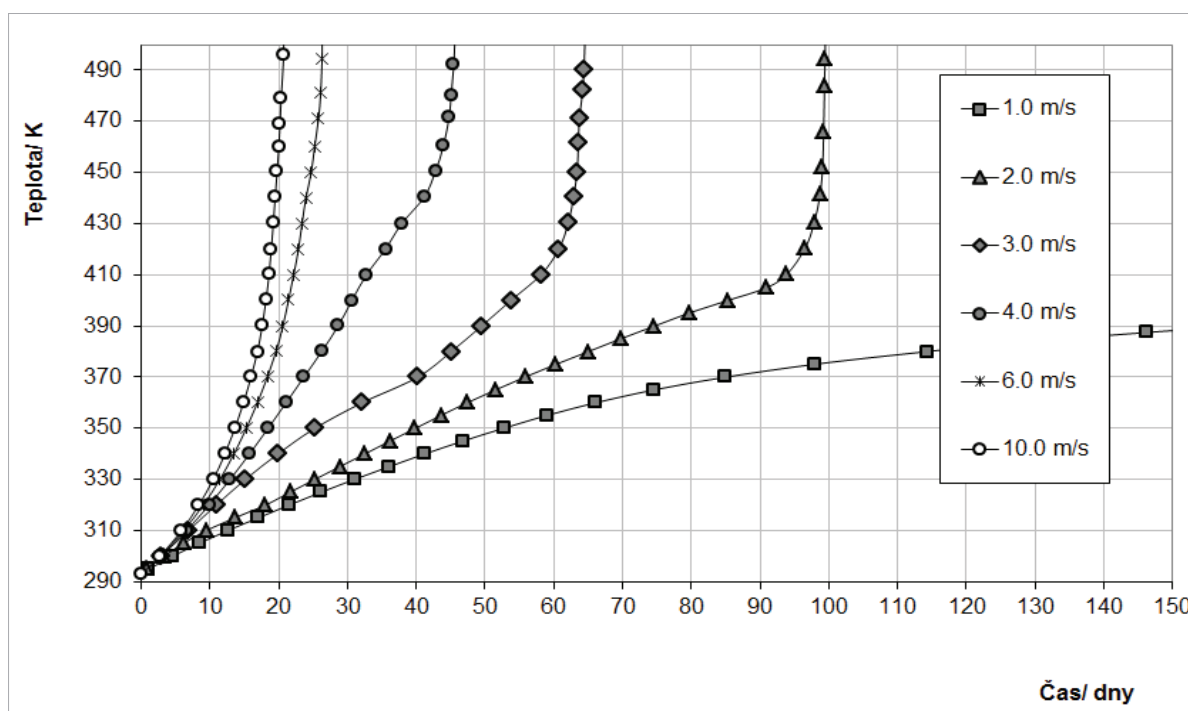
|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| Skládka byla založena v létě                 | 2 body |
| Skládka byla založena na jaře nebo na podzim | 1 bod  |
| Skládka byla založena v zimě                 | 0 bodů |

#### T6: Průměrná doba uskladnění uhlí

Tento ukazatel se snaží postihnout zvyšující se nebezpečí vzniku záparového procesu v závislosti na době setrvání uhlí na skládce. Jakkoliv totiž intenzita oxidační reakce uhlí s časem klesá (viz část U2), je zřejmé, že celkové množství vyvinutého (oxidačního) tepla s rostoucí dobou oxidace monotónně vzrůstá [3]. Z praktického hlediska tak můžeme (kvalitativně) konstatovat, že s rostoucí dobou skladování uhlí vzrůstá nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu.

Při řešení problematiky samovznícování černých uhlí se jako kritérium doby vystavení uhlí oxidačnímu procesu zavedla tzv. inkubační doba, což představuje časový interval, při jehož překročení se samovznícovací proces uhlí dostává do rozvinuté (nekontrolovatelné) fáze (jako synonymum pro tuto inkubační fázi oxidačního procesu lze použít termín „nízkoteplotní oxidace uhlí“). Pro černá uhlí se inkubační doba (obecně) uvádí v intervalu od 3 týdnů do cca dvou měsíců [3]. V případě samovznícování uhlí hnědých se s koncepcí „inkubační doby“ de facto nepracuje, ale s ohledem na výrazně vyšší oxireaktivitu hnědých uhlí oproti uhlím černým (viz např. část U1) se dá očekávat evidentně nižší časová dispozice pro jejich bezpečné uložení.

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícení uhlí na skládkách navrhujeme následovně zohlednit průměrnou dobu setrvání uhlí na předmětné skládce (doba se počítá od dopravení uhlí na skládku):



Obr. 8: Vliv rychlosti větrů na dynamiku samovznícovacího procesu deponovaného uhlí.

|                                                          |        |
|----------------------------------------------------------|--------|
| Uhlí je na skládce deponováno po dobu delší než 4 týdny  | 5 bodů |
| Uhlí je na skládce deponováno po dobu 2-4 týdnů          | 3 body |
| Uhlí je na skládce deponováno po dobu kratší než 2 týdny | 1 bod  |

#### P: Parametry prostředí (meteorologické faktory)

##### P1: Orientace skládky vůči (převládajícím) větrům

Jedním z obecně platných poznatků o projevech procesu samovznícování uhlí na skládkách je fakt, že ohnisko záparu vzniká výhradně na její návětrné straně v hloubce asi 0,5 až 3 m pod povrchem skládky. Zásadní roli při vzniku záparového ohniska tak sehrávají větry, které „narážejí“ na stěny skládky a které představují stěžejní zdroj přísunu kyslíku potřebného pro rozvoj záparového procesu. Význam rychlosti větrů na dynamiku projevu samovznícovacího procesu skládkovaného uhlí byl jednoznačně potvrzen i počítačovými simulacemi [12] a je názorně doložen na obrázku č. 8.

Z obrázku č. 8 přesvědčivě vyplývá, že s rostoucí rychlostí větrů se doba rozvoje samovznícovacího procesu do jeho nekontrolovatelné fáze průkazně zkracuje.

Vliv větrů, jakožto mimořádně závažný parametr, je v návrhu hodnocení bezprostředně obsažen ve dvou ukazatelích. V rámci dále uváděného ukazatele D1 je hodnocena míra zastínění skládky proti nárazům větrů (viz část D1), v rámci

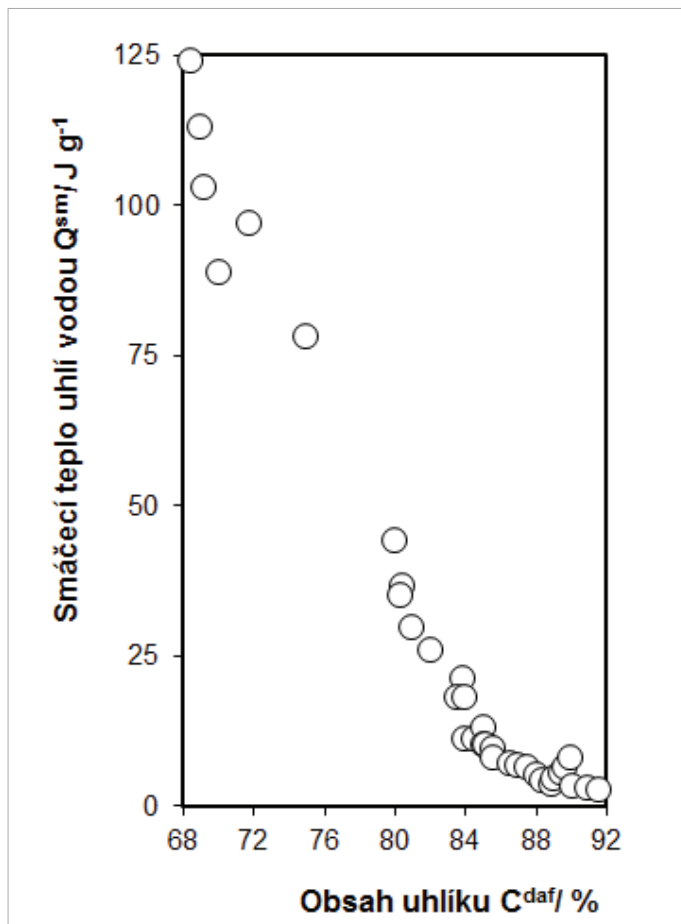
stávajícího ukazatele P1 je zohledněna orientace skládky vůči směru převládajících větrů. Vycházíme přitom z pojetí větru jako silového vektoru, jehož síla se maximálně projevuje při kolmém nárazu na stěnu skládky. Nejnebezpečnější (z hlediska vzniku záparu) je přitom kolmá orientace podélné (nejdelší) boční stěny skládky vůči (převládajícímu) směru proudění větrů. Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícování uhlí na skládkách navrhuje bodově zohlednit orientaci skládky uhlí vůči směru převládajících větrů následovně:

|                                                                                                                          |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Podélná boční stěna skládky je vůči převládajícímu směru větrů orientována kolmo (kolmý směr = $90^\circ \pm 20^\circ$ ) | 3 body |
| Podélná boční stěna skládky je vůči převládajícímu směru větrů orientována v jiném než kolmém směru                      | 1 bod  |

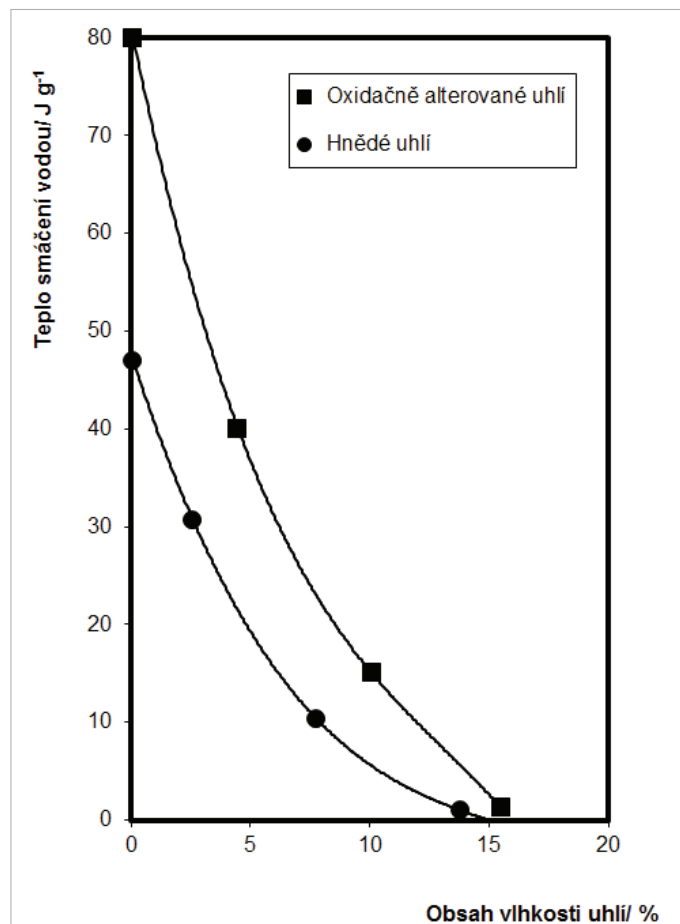
##### P2: Chránění skládky před deštěm

Vodě, jakožto základní komponentě doprovázející uhelnou hmotu, již byla věnována pozornost v rámci ukazatele U2, který hodnotí význam aktuálního obsahu vlhkosti uhlí při jeho interakci s kyslíkem. Vliv vody na samovznícovací proces uhlí je však komplexnější. Značné množství tepla se totiž může uvolnit i pouhým kontaktem kapalně vody s uhelnou hmotou - bez nutné přítomnosti kyslíku. Hovoříme o smáčení uhlí vodou a v reálném prostředí uhelné skládky to vlastně odpovídá „zmoknutí“ deponovaného uhlí deštěm.

Představu o významu uvolněného smáčecího tepla si můžeme konkretizovat z obrázku č. 9, kde jsou vyneseny tepel-



Obr. 9: Hodnoty tepla smáčení vysušeného uhlí vodou v závislosti na obsahu uhlíku.



Obr. 10: Závislost tepla smáčení vodou na vlhkosti uhlí.

né efekty uvolněné při kontaktu vody s vysušeným uhlím v závislosti na jeho prouhelnění (= obsahu uhlíku v hořlavině). Z obrázku č. 9 tak můžeme vyčíst, že při smáčení hnědých uhlí se může uvolnit teplo i více než 100 J/g, což (za předpokladu adiabatických podmínek) může představovat zvýšení teploty o desítky °C „čistě neoxidačním způsobem“. Evidentně se tak může významně navýšit teplotní úroveň oxidujícího se uhlí a v důsledku toho lze (přirozeně) očekávat i urychlení samovznícovacího procesu „zmoklého“ uhlí. To plně odpovídá i poznatkům z praxe. V souvislosti s údaji na obrázku č. 9 je potřeba ještě upřesnit, že uvedená smáčecí tepla byla naměřena pro uhlí vysušená a představují tedy hodnoty maximální. S rostoucím obsahem vlhkosti uhlí se úroveň smáčecího tepla progresivně snižují, jak názorně dokládá obrázek č. 10.

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícení uhlí na skládkách navrhujeme bodově zohlednit možnost akcelerace procesu samovznícování uhlí v důsledku jeho „zmoknutí“ (= smočení kapalnou vodou) následovně:

|                                                                                            |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Skládka vůči dešťovým srážkám není chráněna nebo je chráněna méně než 30 % povrchu skládky | 4 body |
| Vůči dešťovým srážkám je chráněno minimálně 30 % povrchu skládky                           | 2 body |

### P3: Odstínění skládky před sluncem

Tento ukazatel zohledňuje vliv teploty skládkovaného uhlí na proces jeho samovznícování v důsledku dodatečného ohřevu uhlí přímým slunečním svitem. Z šetření na uhelných haldách totiž bylo zjištěno, že na sluncem ozářených místech může povrchová teplota deponované hmoty překročit úroveň 60 °C, což představuje „neoxidační“ ohřev (přibližně) o 30 °C oproti zastíněnému uhlí. Tím se mohou nastolit odlišné („výhodnější“) teplotní podmínky pro „nastartování“ samovznícovacího procesu v takto zateplených místech. Z pohledu snížení míry nebezpečí vzniku záparového procesu je proto jistě vhodnější založit skládku na odstíněném místě či povrch skládky dodatečně zastínit.

Pro účely hodnocení navrhujeme bodově zohlednit možnost navýšení teploty uhlí přímým slunečním svitem následovně:

|                                                                                                    |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Skládka není chráněna před přímým slunečním svitem nebo je zastíněna méně než 30 % povrchu skládky | 2 body |
| Povrch skládky je před přímým slunečním svitem minimálně z 30 % zastíněn                           | 1 bod  |

### D: Dodatečné parametry

#### D1: Zábrana proti přímým nárazům větrů na skládku

Zásadní význam větrů na dynamiku projevu samovznícovacího procesu skládkovaného uhlí byl již komentován (viz část P1), přičemž výše zavedený ukazatel P1 zohledňoval orientaci skládky vůči směru převládajících větrů. V rámci stávajícího ukazatele D1 je situace na skládce hodnocena s ohledem na její ochranu před bezprostředními nárazy větrů. Tyto „větrné zábrany“ přitom mohou být jak ryze přírodního původu (stromy, zástavba), tak překážky realizované dodatečně až po založení skládky (ochranný celistvý plot, pokrytí povrchu skládky neprodyšnou „clonou“). V té souvislosti je potřeba uvést, že

pokrytí návětrné strany uhelné skládky „ochrannou clonou“ či vystavení větruodolné bariéry se (obecně) doporučuje jako preventivní opatření pro zamezení vzniku záparového procesu. V dodatečném větrném zaclonění tak spatřujeme možnost, jak preventivně snížit nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu na předmětné skládce. Poprvé tak zde je použita varianta „záporných“ bodů umožňujících snížit nepříznivou hodnotu bodového zatížení kritéria MHU aplikací dodatečného opatření.

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícení uhlí na skládkách navrhujeme bodově zohlednit míru ochrany skládky před bezprostředními nárazy větrů následovně:

|                                                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|----------|
| Skládka není chráněna před přímými nárazy větrů                     | 4 body   |
| Skládka je před přímými nárazy větrů chráněna přírodními překážkami | 0 bodů   |
| Skládka je před nárazy větrů chráněna dodatečnými clonami           | - 5 bodů |

#### D2: Monitorování stavu skládky

Základním opatřením k odhalení projevů procesu samovznícování uhlí již v jeho raném stádiu je použití vhodných metod monitorujících aktuální stav skládky. Z elementárního pojetí chování systému „uhlí + kyslík = oxidované uhlí + zplodiny + reakční teplo“ je přitom zřejmé, že monitorovací metody mohou být principiálně buďto plynoměrné – s vyhodnocováním přírůstků oxidačních zplodin v ovzduší, nebo teploměrné – s lokalizací a monitorováním místa se zvýšenou teplotou oproti teplotě okolí. Posoudit, která z monitorovacích technik je pro indikaci počátku záparového procesu v uhlí na skládce citlivější (vhodnější) jistě není snadné. V té souvislosti stojí za pozornost zkušenost z šetření na hnědouhelném dole v Handlové, kdy se pro indikaci záparových míst v přístupných místech dolů ukázala citlivější metoda termovizního monitorování povrchových teplot nežli metody plynoměrné [3]. Na měření teplot (přednostně) spoléhala také dlouhodobá monitorování skládek [11], která byla realizována v rámci řešení projektu TA ČR TA1020351, a rovněž ČSN 441315 uvádí měření teplot jako základní prostředek pro kontrolu stavu uhelných deponií.

Pro účely hodnocení navrhujeme bodově zohlednit především skutečnost, zdali je či není nasazena „nějaká“ technika k monitorování dané skládky. Aplikace monitorovacích metod je přitom zohledněna odečtem hodnotících bodů (= zápornými body). V nasazení monitorovací techniky na předmětnou skládku tak spatřujeme další možnost, jak snížit hodnotu bodového zatížení míry nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu. Konkrétní hodnota bodového odpisu pak souvisí s typem aplikované monitorovací techniky, přičemž za nejvhodnější pokládáme teplotní měření a nejméně operativní diskontinuální plynové analýzy. Při vlastní realizaci monitoringu pak jednoznačně doporučujeme respektovat zásady a postupy uvedené v ČSN 441315, respektive v certifikovaných metodikách vyvinutých při řešení projektu TA1020351:

|                                                                                                    |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Na skládce je měřena teplota v souladu s ČSN 441315 resp. certifikovanou metodikou č. C -065/13    | - 8 bodů |
| Na skládce je monitorován vývin oxidu uhelnatého v souladu s certifikovanou metodikou č. C -064/13 | - 5 bodů |

|                                                                                                              |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Na skládce je monitorován vývin dalších indikačních plynů v souladu s certifikovanou metodikou č. C - 064/13 | - 3 body |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

### D3: Ošetření uhlí inhibitorem

Jedním ze způsobů, jak ovlivnit samovznícování uhlí, je impregnace uhlí chemickými inhibitory zpomalujícími oxidační proces uhlí se vzdušným kyslíkem. Ze studia inhibičních účinků 14 různých sloučenin [13] vyplynuly následující výsledky, které v kontextu předmětného hodnocení pokládáme za zásadní:

- Nebyl nalezen „žádný“ inhibitor, který by byl univerzálně použitelný pro jakýkoliv typ uhlí. Vhodnost daného inhibitoru je třeba posuzovat pro příslušný typ uhlí individuálně.
- Jako nejnadějnější chemická látka pro inhibici oxidace uhlí (vyhovující i hygienickým požadavkům) se ukazuje močovina aplikovaná ve formě 10% vodného roztoku.
- Byly zjištěny i chemické látky, které neinhibují, ale naopak akcelerují oxidační proces na uhlí (přestože jejich použití pro „inhibici“ samovznícovacího děje uhlí bylo v literatuře popsáno). Takovýmto příkladem je thiomocovina či siřičitan sodný [13].

Pro účely hodnocení nebezpečí vzniku samovznícování uhlí na skládkách navrhujeme možnou aplikaci chemického inhibitoru na deponované uhlí bodově zvýhodnit. To je (opět) zohledněno odečtem hodnotících bodů (= zápornými body). Jako inhibitor pro operativní použití přitom navrhujeme močovinu. Vhodnější variantou je ale individuální posouzení účinného inhibitoru pro dané, deponované uhlí na základě laboratorních zkoušek:

|                                                                                                               |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Skládkované uhlí bylo ošetřeno roztokem močoviny jakožto inhibitorem procesu samovznícování                   | - 4 bodů |
| Skládkované uhlí bylo ošetřeno roztokem inhibitoru, který byl pro dané uhlí doporučen z laboratorních zkoušek | - 7 bodů |

### 3 Závěr

Představený způsob hodnocení míry nebezpečí vzniku samovznícovacího procesu hnědého uhlí na skládkách vychází z číselného vyjádření hodnoty kritéria MHU sečtením bodového zatížení jednotlivých ukazatelů, jak jsou popsány v tomto článku. Ukazatele ze skupiny D (dodatečné parametry) jsou ohodnoceny „zápornými“ body a představují tak způsob, jak zmírnit negativní bodové zatížení posuzované skládky. Verifikace tohoto nového způsobu hodnocení uhelných skládek byla realizována v tomto (závěrečném) roce řešení projektu TA01020351 programu ALFA, kdy se k vypracovanému návrhu hodnocení vyjádřili odborníci se zkušenostmi se skládkováním uhlí. Výše uvedený článek tak již představuje upravenou verzi hodnocení se zakomponovanými připomínkami oponentů.

### Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci programu ALFA projektu TA01020351 za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím TA ČR a při řešení projektu LO1208 "TEWEP" za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I.

### Literatura

- [1] TARABA, B., VORÁČEK, V., KRÁL, V.: *Analýza případů samovznícování uhlí v dolech OKR - část I: Nový způsob hodnocení Rizika vzniku procesu samovznícování uhlí ve stěnových porubech*. Uhlí, rudy, geologický průzkum. 2006, roč. 13, sv. 11, s. 34-37.
- [2] TARABA, B., PAVELEK, Z., JANEK, J., VORÁČEK, V., KRÁL, V.: *Analýza případů samovznícování uhlí v dolech OKR - část II: Hodnocení požárního ohrožení porubu z hlediska provedení adekvátních represivních zásahů*. Uhlí, rudy, geologický průzkum. 2006, roč. 13, sv. 12, s. 28-31.
- [3] TARABA, B.: *Nizkoteplotní oxidace a samovznícování uhelné hmoty*, Ostravská univerzita, 2003, 112 str., ISBN 80-7042-832-5.
- [4] 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.
- [5] CHEN, X.D., STOTT, J.B.: *The effect of moisture content on the oxidation rate of coal during near-equilibrium drying and wetting at 50 °C*. Fuel 72 (1993) s. 787.
- [6] DOBAL, V., SÝKOROVÁ, I., VALEŠKA, F., HEMELÍKOVÁ, B.: *Metody stanovení aktivity hnědých uhlí ke kyslíku*, Výzkumná zpráva ÚGG ČSAV Praha, 1983.
- [7] AKGUN, F., ARISOY, A.: *Effect of particle size on the spontaneous heating of a coal stockpile*. Combustion and Flame 99 (1994) s. 137-146.
- [8] KAJI, R., HISHINUMA, Y., NAKAMURA, Y.: *Low temperature oxidation of coals – a calorimetric study*, Fuel 66 (1987) s. 154.
- [9] MICHALEC, Z., MICHALCOVÁ, V., TARABA, B.: *Modelování vlivu parametrů uhelné skládky na dynamiku samovznícovacího procesu*. Zpravodaj Hnědé uhlí, č. 1 (2013), s. 3 - 10, ISSN 1213–1660.
- [10] AGKUN, A., ESSENHIGH, R.H.: *Self-ignition characteristics of coal stockpiles: theoretical prediction from two-dimensional unsteady-state model*. Fuel 80 (2001) s. 409-415.
- [11] MONI, V.: *Výhodnocení komplexních dlouhodobých měření na hnědouhelných skládkách*. Zpravodaj Hnědé uhlí, č. 2 (2014), s. 27 – 35, ISSN 1213–1660.
- [12] TARABA, B., MICHALEC, Z., MICHALCOVÁ, V., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M., KOZUBKOVÁ, M.: *CFD simulations of the effect of wind on the spontaneous heating of coal stockpiles*. Fuel 118 (2014) 107-112.
- [13] TARABA, B., PETER, R., SLOVÁK, V.: *Calorimetric investigation of chemical additives affecting oxidation of coal at low temperatures*. Fuel Processing Technology 92 (2011) 712–715.