

EXPERIMENTÁLNÍ PÁLENÍ DŘEVĚNÉHO UHLÍ V JAMÁCH

JIŘÍ KMOŠEK

Úvod

Dřevěné uhlí mohlo být lidmi využíváno minimálně od dob nejstaršího zpracování kovového materiálu. Vždy se úzce vázalo na metalurgii kovů hlavně pro svoji vyšší výhřevnost než dřevo. Znalost cílené výroby dřevěného uhlí je považována za jeden z nejstarších ovládnutých chemických procesů vůbec. Dřevěné uhlí bylo palivem pro tavení v době bronzové a železné, ale nelze přesně říci, kdy se dřevěné uhlí začalo úmyslně vyrábět, protože zpočátku mohlo být nahrazeno dřevem. Ve středověku se využití dřevěného uhlí rozšířilo i do hamrů, vysokých pecí a také dalších oblastí běžného života.

Do zavedení moderního způsobu výroby dřevěného uhlí v železných pecích se používala základní metoda pálení dřevěného uhlí v nadzemních milířích, a to až do začátku 20. století. Milířů je několik typů. V zásadě jde o narovnanou hromadu dřeva opatřenou izolační pokrývkou k zamezení přístupu vzduchu. Další možnou metodou, užívanou spíše v pravěku a středověku, jsou uhelné jámy, ale jejich využití je zatím z důvodu absence většího množství archeologických podkladů a historických zpráv opomíjeno (Pleiner 2000, str. 119). Záměrem našeho experimentu bylo přispět k diskuzi a případnému objasnění této problematiky. Tento experiment představuje možné řešení výroby dřevěného uhlí v době železné, ale je uplatnitelný zároveň i v jiných obdobích pravěku a středověku. Hlavním cílem experimentu je na základě shromáždění dostupných informací a zpráv o technologii pálení dřevěného uhlí v jamách se pomocí terénních experimentů seznámit s touto technologií a zjistit základní vlastnosti a možnosti uhelných jam. Dalším cílem je obsáhnout základní výrobní postupy v experimentálních výpalech a zjistit jejich efektivitu. Dále se budeme snažit najít výrobní postup, který by se ve výsledku shodoval s archeologickou předlohou. Na základě získaných podkladů provést syntézu dat a vyhodnotit výsledky. Důležitým aspektem experimentu je možnost srovnání výsledků z uhelných jam s technologií milířů.

Podklady

Při hledání historických podkladů pro praktikování technologie pálení uhlí v jamách se můžeme zaměřit na čtyři základní zdroje: hmotné archeologické nálezy, historické zprávy o tradičním uhlířství, sledování stále ještě živých výrobních postupů a výsledky podobně zaměřených terénních experimentů nebo laboratorních experimentů. Z velké části můžeme hledat oporu v základních technologických postupech u související technologie milířování¹.

Archeologické podklady

O nejstarším možném praktikování technologie uhelných jam nás informuje několik hmatatelných archeologických nálezů. Na území Evropy bylo v průběhu minulého století nalezeno několik jam, které

svým obsahem a tvarem můžeme řadit mezi tzv. uhelné jámy. Nálezy pocházejí převážně z oblasti střední a severní Evropy a Skandinávského poloostrova.

Tři cylindrické jámy byly odkryty v roce 1941 na bývalém galo-římském sídlišti v **Kellerbergu** u Postupimi (Pleiner 2000, str. 121). Jámy byly porušeny bagrováním, hluboké byly 120 cm a průměr činil 100 cm. Na kotlovitém dně ležela 30 cm vysoká vrstva dřevouhelného mouru, zasypaná na povrchu kamením (Obr. 1), které původně nejspíše posloužilo jako izolace proti vnikajícímu vzduchu. Další tři jámy kotlovitého tvaru byly vykopány na sever od pozdně halštatských tavicích pecí ve **Waschenbergu** v Rakousku (Obr. 2). Měly tvar válce o průměru 80–100 cm a hloubka kolísala mezi 110–140 cm. Dno bylo naplněno vzájemně promíšenými úlomky do červena vypáleného jílu, popela a 50 cm vysokou vrstvou dřevěného uhlí. Autor nálezu při srovnávání s jinými pyrotechnickými nálezy tyto jámy interpretuje jako jámy používané vyložené pro místní produkci dřevěného uhlí (Pleiner 2000, str. 121). V lese blízko **Nienburgu** v severozápadním Německu byla vykopána válcová jáma, 85 cm v průměru a 90 cm hluboká, naplněná kameny. Základna a část stěn byla ohněm vypálená až na písčité podloží. Není zde zaznamenáno žádné dřevěné uhlí, ale autor poukazuje na analogie, pro které by mohla být jáma používána na pálení dřevěného uhlí. Nebyly zde však nalezeny žádné datovatelné prvky, ačkoliv byla zakryta hromadou strusky, tak se její stáří připisuje do středověku (Pleiner 2000, str. 121). V **Tindimurru** v západním Rakousku byly nalezeny dvě poměrně velké a výjimečné obdélníkové jámy. Jejich velikost byla 190 × 210 cm a 220 × 250 cm, s hloubkou přes 100 cm. Byly naplněny zkrříženými kusy dřeva, které bylo spálené, a také červeně vypálenou zeminou a kousky roztavené strusky. V okolí byly nalezeny kusy nesoudržné taveniny a strusky. Datování radiokarbonovou metodou určilo stáří ohořelého dřeva na rok 70 n. l., ±70 let. Autor předpokládá, že dřevěné větve byly původně v jámě pokryté zeminou a poté rozníceny přes středový vertikální kanál (Pleiner 2000, str. 121). I. Englund vykopal železářské pece v části Švédska **Trameno**, kde se zároveň nacházely i uhelné jámy 3 × 5 m velice podobné nálezu z Tidimurru. Radiokarbonové datování ukázalo, že stáří jam se pohybuje okolo 13.–14. století n. l.² (Pleiner 2000, str. 121). Stovky uhelných jam jsou známy z raných železovýrobních oblastí v Norsku, ale jak se zdá, hodně z nich patří do skupiny propadlých hald zanechané těžební činností (Pleiner 2000, str. 121).

Poslední dva nálezy z výběru dostupné literatury jsou z pozdně laténského sídliště v **Praze-Bubenči** a posloužily zároveň jako podklady pro naše experimenty³ (Pleiner 2000, str. 121 a Pleiner 1958, str. 66). Na jaře roku 1949 došlo při terasovité úpravě terénu na rohu Arraské ulice a Ve struhách k nálezu válcové jámy (Obr. 3), zahloubené 145 cm do šterkové terasy a překryté 35 cm silnou vrstvou písčité hlíny. Válcová jáma se svislými stěnami o průměru přibližně 80 cm měla kotlovité dno. Stěny i dno pece byly tvořeny písčítým a šterkovým prostředím terasy a byly žárem vypáleny do červena do hloubky 5–8 cm (Obr. 5). Na dně pece byla 30 cm silná popelovitá vrstva se zbytky dřevěného uhlí. Nad ní byly nahromaděny kusy vypálené mazanice velkých rozměrů, které vyplňovaly převážnou část jámy. Zbytek jámy byl vyplněn šedavou splavenou hlínou. Úlomky mazanice z jemné jílové hlíny, promíšené plevami, jsou na jedné straně vyhlazeny a na druhé straně nesou zřejmé otisky kulatého průřezu o přibližném průměru 12 cm (zřejmě otisky dřevěné konstrukce roštu). Druhá jáma nalezená na jaře roku 1950 v ulici Ve struhách měla s prvním nálezem stejné rozměry a i její tvar byl s ní shodný (Obr. 4). V zásypu jámy na rozhraní popelovité vrstvy a mazanice se nacházelo několik střepů datovaných do nejmladší doby laténské a také se zde nacházely mohutné jelení parohy i s částí lebky a kamenný žernov. Pro oba nálezy z Prahy-Bubenče je charakteristický válcový tvar jámy a popelovitý zásyp spolu s kusy mazanice na kotlovitém dně jámy.

Podobně je tomu i u nálezů v Kellerbergu a Waschenbergu, které mají s Bubenečskými srovnatelné rozměry a podobají se i větším počtem, ve kterém se nalézají.

Historické zprávy

Nejucelenější pohled na uhlířství ve středověku jistě poskytuje Biringucciova *Pirotechnica* z roku 1540 (Smith 1990, str. 173–178), která popisuje postup pálení dřevěného uhlí v jamách a srovnává výhody a nevýhody této technologie s pálením v milířích. Pálení probíhalo v jamách o průměru 70 cm a přibližně té samé hloubky. Jáma se zaplnila silnějšími poleny nebo pařezy kručinky a kaštanu (Obr. 6) s tím, že bylo nutné ponechat ve středu až na dno jámy prázdný kanál, který sloužil k zapalování a rozšíření ohně po vyspání žhavých uhlíků. Vrchní otvor se pokryl kapradím nebo chvojím kručinky a zasypal zeminou. Bylo ponecháno pouze několik otvorů pro únik kouře a vlhkosti. Proces zuhlení trval 8–10 hodin, poté se utěsnily všechny otvory a uhlí se ochlazovalo. Biringuccio na závěr podotýká, že uhlí vypálené v jamách oproti uhlí z milířů není vhodné pro tavení, dokonce ani pokud se použije kvalitního tvrdého dřeva. Pálili si ho prý sami kováři pro svoje potřeby a bylo nutné použít silnější proud vzduchu z měchů, protože takto vyrobené uhlí nehoří tak dobře.

Další zmínka o pálení v jamách je od Colleputta (Pleiner 2000, str. 118), který se v anglických písemných pramenech z 11. století zmiňuje o tomto způsobu výroby pro obyčejné účely vytápění a vaření. Pálení dřevěného uhlí v jamách pro výrobu kovů a jiné účely bylo běžnou praxí v Rusku až do 17.–19. století a v některých oblastech i po roce 1900 a je dobře popsáno v ruské národopisné literatuře (Pleiner 2000, str. 119). Používaly se dva druhy jam – kruhové a prodloužené (4 m × 2 m a 1 m hluboké), které bývaly utěsněny zelenými větvemi, plátnem a jílem a pálení zabralo 3–4 dny. Používaly se také nezakryté jámy, které byly postupně plněny dřevem, pokládaným na již hořící vrstvu, ale jejich postup je zatím nejasný.

Doklad o pálení uhlí v jamách máme i z Číny (Percy 1863, str. 140). Číňané v minulosti znali dvě metody výroby uhlí: při písčité půdě v otevřených jamách (Obr. 7) a při hliněné půdě v otevřených překlenutých podzemních komorách. Jámy používané v písčité půdě byly válcové, 2 m hluboké a okolo 4 m široké. U takto velkých jam se požíval jeden pomocný komín blíže neurčené funkce o tloušťce 18–35 cm, který sahal až do hloubky 1 m, byl napojený na dřevěnou vsázku a vyústoval 0,2 až 0,35 m pod úroveň země. Naproti tomuto komínu byl připojený mírně nakloněný odvětrávací kanál, který vyústoval 1 m nad povrch. Proces pálení probíhal následovně: dno se obložilo suchým chřastím, na které se natěsno narovnálo palivo, následně se otvor jámy pokryl chřastím a důkladně zeminou. Zapálení se provádělo odvětrávacím kanálem, aby se oheň rychleji rozšířil, dělal se jeden otvor v hliněném plášti v blízkosti komínu, který se po objevení kouře zavřel. Když se objevil silný dým, zakryl se hliněný plášť kameny a ponechalo se pouze nezbytné množství průduchů. Pálení trvalo 5 dnů a přibližně stejnou dobu uhlí chladlo. Podle Číňanů je největší výtěžek z čerstvě posekaného dřeva a dosahuje tak 30–35 %.

Pálení dřevěného uhlí v jamách vždy zastávalo důležitou roli na území Afriky, kde se tato technologie na některých místech praktikuje ještě v dnešní době (FAO 1987), například v Ghaně ve východní části Afriky. Typické jámy používané pro pálení uhlí jsou obvykle větších rozměrů (30 m³), ale používaly se i jámy menší (1 m³), převážně pro potřeby na úrovni vesnice, ale nehodící se již pro komerční účely. Výpal v těchto malých jamách probíhal následovně: založil se oheň v jámě a za stálého hoření se přidávalo nejprve malé suché palivo, poté větší kusy a průběžně se silný oheň hasil vodou. Na zaplněné jámě

se vytvořila 20 cm silná vrstva listí a stejně silná vrstva zeminy. Jáma se ponechávala samovolně karbonizaci a mohla být otevřena přibližně za dva dny. Výsledné dřevěné uhlí prý nebylo jednotné v kvalitě a při použití menších kusů dřeva bylo i výsledné uhlí příliš drobné. Za komerčním účelem se používaly spíše obdélníkové jámy větších rozměrů. Tyto jámy se hloubily nejčastěji v blízkosti vodního toku, kde se nacházela silná vrstva zeminy a dostatek vody. Jako palivo se mohly použít i větší kusy dlouhého dřeva (Obr. 9), které však musely být důsledně vyskládané kvůli objemové účinnosti, a na dně příčně podložené několika poleny pro lepší proudění vzduchu v průběhu výpalu (Obr. 8). Jáma je příčně překryta poleny, které přesahují přes okraj jámy, na které je později navršena izolační vrstva zeminy. Na protilehlých koncích jámy jsou umístěny dva průduchy, jeden slouží k zapálení dřeva a zároveň k nasávání vzduchu v průběhu destilace a druhým otvorem unikají zplodiny (Obr. 10). Karbonizační fáze může trvat 20–30 dní a dosahuje se objemové výtěžnosti 30–50 %. Chladnutí vsázky je závislé na počasí a trvá přibližně 40 dnů. Kvůli charakteristické karbonizaci v jámě se obtížně dosahuje jednotně karbonizované vsázky. Dřevěné uhlí na zapalovaném konci má zpravidla nízkou koncentraci těkavých látek, protože bylo podrobeno karbonizační teplotě po delší dobu, než na opačném konci. Celý tento výrobní cyklus trvá 3 měsíce a připravuje ho posádka pěti mužů, výsledkem je 6 tun dřevěného uhlí. V Africe se kromě uhelných jam používaly také nadzemní kupy (milíře), které měly výhodu v tom, že dřevo použité na jejich stavbu se v málo lesnatých oblastech schraňovalo po delší dobu, rovnalo do konečné kupy a nakonec se jednoduše opatřilo izolačním krytem a zapálilo.

F. V. Kelley se v knize o pálení dřevěného uhlí (Kelley 2002, str. 5–6) okrajově zmiňuje o výrobě dřevěného uhlí v obdélníkových mělkých jamách, podobných výše zmiňovaným, a řadí je do typu severoafrické metody. Pečlivě narovnaná vsázka dřeva má být zapálena na užší straně a oheň se během 10–15 dnů rozšíří k širšímu vzdálenému konci (Obr. 11). Jako izolační vrstva se používala vegetace nebo sláma (Obr. 12) pokrytá zeminou, kterou bylo nutné v průběhu destilace udržovat vlhkou. Ke konečnému ochlazení vypáleného uhlí se podle autora používala protékající voda v jámě, která uhlí navlhčila a znečistila a výsledný produkt prý nebyl vysoké kvality.

Jan Doležal se ve svém spise věnovaném lesnímu řemeslu (Doležal 1872, 238–239) zmiňuje o získávání dřevěného uhlí v jamách na českém území, které se ale v poslední době omezovalo pouze na použití dříví oklestkového. Podotýká, že s rostoucí cenou dřevěného uhlí se upouští od této technologie. Podle autora popisuje se jáma vyhloubila v tvrdé, ne však kamenité půdě, ve tvaru obráceného kužele 75–100 cm hluboká a u otvoru 120–160 cm široká. V jámě se podpálilo několik otýpek oklestkového drobného dřeva o délce 50–60 cm a průměru svazku 20 cm, na které se postupně nakladly až po vrch další otýpky, které by správně neměly hořet, ale jen doutnat. Slehnutý prostor po zuhlených otýpkách se zaplnil dalšími otýpkami a na poslední vrstvu se položily drny obložené hlínou, aby se oheň dusil. Po 34–36 h se podle popisu autora vyhrabovalo lehké, drobné a křehké uhlí, které se dále prosívalo od hlíny a uhelného prachu. Dále se zde autor zmiňuje o pálení v jamách v souvislosti s výrobou střelného prachu. K výrobě se používaly vyzděné jámy dobře kryté železným víkem s otvory k regulaci procesu. Pálilo se hlavně měkké lipové, řešetlákové, vrbové a lískové dříví a výsledky byly prý nedokonalé a neposkytovaly žádoucího výsledku. Autor zde podotýká, že v tehdejší Švédsku, Rusku a Polsku se pálení v jamách používalo za účelem získávání dehtu, který je vedlejším produktem při výrobě dřevěného uhlí.

Pálení dřevěného uhlí v jamách za komerčním účelem můžeme v dnešní době vysledovat pouze na některých místech v Africe (FAO 1987, Kelley 2002), ale zatím jsme bez dalších zpřesňujících informací. Naopak pálení dřevěného uhlí v milířích je výjimečnou komerční záležitostí v některých částech východní Evropy⁴.

Proběhlé experimenty

Nejsou známy žádné odborně publikované články o problematice experimentálního pálení dřevěného uhlí v jamách, podle zjištění autora se na české půdě jedná o pokus nový a z praktické stránky zcela neznámý a nevyzkoušený. Technologicky je postup podobný s pálením dřevěného uhlí v nadzemních milířích, proto se při rekonstrukci výrobního postupu můžeme v základních bodech opřít o poznatky z experimentálních pálení dřevěného uhlí v milířích. Touto problematikou se v posledních letech odborně zabýval B. Dragoun a V. Matoušek na půdě archeologického skanzenu Villa Nova v Uhřínově p. Deštnou (Dragoun, Matoušek, 2004), kde proběhly zároveň naše experimenty s uhelnými jámami. Další experimentální výpaly milířů proběhly ve Lhotě u Kladna (Cyrus, Matoušek 2009, str. 54–60). Dlouhodobě se pálením milířů tradičními technologiemi zabývá také J. Kadera⁵. V praktické stránce experimentu jsme zároveň vycházeli ze zkušeností ze dvou vlastních výpalů milíře (2008, 2009). První proběhl v archeoskanzenu Villa Nova (Kmošek 2008, str. 17–19) a druhý, který je zatím nepublikovaný, v areálu Valdštejnské loggie v Jičíně.

Technologie výroby a vlastnosti dřevěného uhlí

Dřevěné uhlí je lehká a velice porézní hmota (až 85 % celkového objemu hmoty tvoří plyny vyplněné prostory) s vysokou výhřevností a vyniká vysokou čistotou (nízkým obsahem těkavých látek). Vyrábí se suchou destilací dřeva (pyrolýzou), respektive zahříváním dřeva za omezeného přístupu vzduchu. Obsah fixního uhlíku je závislý na množství faktorů (viz níže), ale v suchém stavu může dosahovat až 95 % C (Psota 1960, str. 301–305). Složení dřevěného uhlí je závislé na surovině, ze které je vyrobeno a technologii výroby, ale zpravidla obsahuje pouze mizivé množství fosforu a síry oproti kamennému uhlí a dále obsahuje pouze 1–3% nespalitelných látek (popelu). Kvalitu dřevěného uhlí lze určit laboratorními analýzami nebo jednoduše posoudit podle jistých indikátorů, jak to celkem spolehlivě praktikovali sami uhlíři. Dobré dřevěné uhlí je černé barvy, která by neměla zanechávat stopu, při poklepu by mělo zvonit jasným zvukem a při spalování by nemělo hořet plamenem a produkovat dým. Dalšími indikátory je měrná hmotnost uhlí, lámavost a výhřevnost (Dragoun, Matoušek 2004, str. 749–751).

Dřevo se skládá ze tří hlavních částí: celulózy, ligninu, vody a doprovází ho i stopové množství organických a anorganických látek (cukry, tuky, sílice, sloučeniny fosforu, síry, draslíku, vápníku...). Při suché destilaci dřeva se uvolňuje velké množství plynů, které obsahují vodní páry, methanol, kyselinu octovou, vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a množství dehtů. Prvním krokem při karbonizaci je vysychání dřeva při 100 °C nebo nižší teploty na nulový obsah vlhkosti, tento proces je doprovázen částečným spalováním dřeva. Vzniká endotermická reakce, při které je množství spáleného dřeva úměrné množství uvolněné vlhkosti. Po vysušení dřeva se karbonizační teplota zvyšuje asi na 280 °C, dřevo se začne spontánně přeměňovat na dřevěné uhlí a produkuje množství hustého štiplavého dýmu. V další fázi, kdy se teplota zvyšuje nad 280 °C, se uvolňuje množství energie, dochází k exotermické reakci a přísun vzduchu je v této fázi omezován na minimum. Do 300 °C je reakce velmi rychlá, vzniká okolo 75 % produktu. Tento proces spontánní karbonizace pokračuje, dokud se všechny karbonizační zbytky nepřemění na dřevěné uhlí. Není-li zajištěno další vnější teplo, proces se zastaví a teplota dosahuje maximálně okolo 400 °C. Toto uhlí však bude ještě obsahovat značné množství zbytků dehtu, společně s popelem z původního dřeva.

Obsah popelu v uhlí je asi 3–5%, dehtový zbytek může činit až 30 % hmotnosti a zastoupení fixního uhlíku je 65 až 70 %. Další růst teploty zvyšuje obsahu fixního uhlíku tím, že se přeměňuje více dehtů. Při teplotě 500 °C je udáván typický obsah fixního uhlíku asi 85 % a obsah těkavých látek asi 10 %. Výnos z dřevěného uhlí při této teplotě je asi 33 % hmotnosti suché vsázky na karbonizované dřevo – nepočítáme-li dřevo, které bylo spaleno jako karbonizační zbytek. Teoretický výnos dřevěného uhlí se mění s teplotou karbonizace v důsledku změny jeho obsahu těkavých dehtových složek. Cílem každé pyrolýzy by mělo být dosažení teploty okolo 500 °C rovnoměrně v celé vsázce. S uhelnými jámami je to obtížné, protože cirkulace vzduchu a chladicí účinky jsou nerovnoměrné, vyskytují se zde studená místa a jejich ovlivnění je téměř nemožné. Výnos dřevěného uhlí je také ovlivněn druhem použitého dřeva. Existují důkazy (FAO 1987), že vysoký obsah ligninu ve dřevě má pozitivní vliv na výnos dřevěného uhlí. Proto zralé dřevo v bezvadném stavu je přednostní pro výrobu dřevěného uhlí (FAO 1987).

Karbonizační teplota	Chemické analýzy dřevěného uhlí		Objemová výtěžnost dřevěného uhlí na základě vsázky suchého dřeva
°C	% fixního C	% těkavých látek	0% vlhkosti
300	68	31	42
500	86	13	33
700	92	7	30

Tabulka 1: Vliv konečné teploty karbonizace na výnos a složení uhlí (podle FAO 1987)

Nebereme-li v potaz technologii zuhlení, tak lze obecně říci, že kvalita dřevěného uhlí odpovídá vlastnostem použitého dřeva. Dřevěné uhlí je možné získat z libovolného dřeva, ale jeho kvalita je ovlivněna mnoha faktory. Nejvíce se na vlastnostech dřevěného uhlí projeví charakter a druh použité dřeviny, její stav, doba těžby, zpracovávaná část stromu a velikost použitých polen. Obecně tvrdé dřeviny (dub, buk, javor, jasan, ořech) poskytují mnohem vyšší výhřevnost při spalování (7600–8000 kcal) a delší dobu hoření než měkké dřeviny (olše, bříza, modřín borovice, smrk, lípa), (Dragoun, Matoušek 2004, str. 731–732). Pro potřeby vysokých pecí v minulosti se nejvíce používalo uhlí z dřeva dubu, buku a habru, ale na rozborech dřevěného uhlí z archeologických lokalit v Evropě je vidět velká různorodost použitých dřevin (Pleiner 2000, str. 117). Můžeme se proto domnívat, že zejména v pravěkém uhlířství byla používána výhradně surovina, která byla v danou dobu k dispozici v blízkosti místa pálení. Na kvalitě a výtěžnosti dřevěného uhlí se velmi projevuje i vlhkost dřeva, která souvisí s uložením dřeva. Na zuhlení vlhkého a ztrouchnivělého dřeva je vyvíjeno velké množství tepla, které doprovází spalování určité části suroviny a uhlí je ve výsledku drobné a málo pevné. Drobnost dřevěného uhlí a obsah fixního uhlíku roste se zvyšující se teplotou karbonizace, doprovázenou snižováním množství těkavých látek. Teplota ve výši 450 až 500 °C dává optimální rovnováhu mezi drobností a obsahem fixního uhlíku (FAO 1987).

Kvalitnější uhlí produkuje také dřevo, které bylo pokáceno mimo vegetační období. Rozdílnou kvalitu uhlí poskytují také různé části dřeviny, zejména části pařezovité jsou mnohem výhřevnější než zuhlené větve. Je-li dřevěné uhlí určeno pro výrobu železa, je nutné vždy dříví zbavit kůry, protože obsahuje P_2O_5 , který přechází při tavbě do železa, a zároveň z toho důvodu, že kůra slouží jako dobrá izolace proti účinkům pyrolýzy (Psota 1960, s. 301–305). Velikost dřeva je závislá spíše na samotné technologii pálení, jak dokládají africké postupy (Obr. 9, 11), ale obecně je velikost dřeviny úměrná velikosti vsázky.

Průběh vlastních experimentů

Celkem bylo uskutečněno 12 terénních experimentů s výpaly dřevěného uhlí, z toho 10 výpalů v jamách a 2 v menších milířích. Všechny experimenty byly realizovány na půdě archeoskanzeny Villa Nova v Uhřetíně pod Deštnou ve dvou etapách, 18.–26. 8. 2009 a 13.–18. 8. 2010. Pracovní a organizační stránku terénního experimentu zajišťovali členové Spolku archaických nadšenců ze Sebranice u Litomyšle, celkem 4 muži ve věku 17–22 let. Pro pálení byla zvolena louka na mírném JV svahu ve vzdálenosti 20 m od potoka, která byla z 1/3 obklopena lesním porostem. Toto místo se nám jevilo jako dobře chráněné proti silnému větru, ale hlavně silné jílovité podloží bylo vhodné pro vyhloubení jam. Jako archeologická předloha pro uskutečněné experimenty J1–J6, J8 a J10 posloužil nález dvou válcových jam v Praze-Bubenci (Obr. 3,4) a pro možné srovnání byl zvolen pro J7 a J9 nález jam z Kellerbergu (Obr. 1). Pokud chceme komplexně obsáhnout všechny možné technologické postupy při pálení dřevěného uhlí v jamě typu Bubeneč a najít ten nejoptimalizovanější postup (nejméně materiálně a fyzicky náročný a s co možná nejvyšší výtěžností), nabízejí se nám následující možné postupy:

zapálení			rozrovnání vsázky	uzavření otvoru
od shora			horizontálně	stabilní izolací
				posuvnou izolací
	vertikálně		libovolně se zachováním snadno hořlavého středu	stabilní izolací
				posuvnou izolací
od spodu	před rozrovnáním		libovolně	stabilní izolací
				posuvnou izolací
				bez uzavření
	po rozrovnání	pomocí středového průduchu	horizontálně	stabilní izolací
				posuvnou izolací
				bez uzavření
		vertikálně	libovolně se zachováním středového průduchu	stabilní izolací
				posuvnou izolací
				bez uzavření
		pomocí průduchu ve stěně jamy	libovolně	stabilní izolací
				posuvnou izolací

Tabulka 2: Přehled možných technologických postupů uplatnitelných při pálení dřevěného uhlí v jamách

Nejzákladnější rozdělení je na zápal vsázky dřeva od spodu a zápal od shora.

Zapálení dřevěné vsázky od spodu je možné uskutečnit metodou rozdělení ohně na dně jamy a následným rozrovnáním vsázky⁶. Druhou možností je narovnání vsázky a vysypání žhavých uhlíků prázdným středovým otvorem na dno jamy, jak to popisuje Biringuccio ve své Pirotechnice (Smith, Gnudi 1990,

str. 177). Poslední možností je použití vzduchových kanálů v hliněném plášti jámy, kterými se dřevěná vsázka od spodu zapalovala a sloužila jako přiváděč vzduchu na dno hluboké jámy (Percy 1863, str. 140). Tato varianta ale v případě archeologického podkladu z Prahy-Bubeneč nepřípadá v úvahu, protože nález žádné podobné prvky neobsahoval. **Zapálení rozrovnané vsázky od shora** je možné provést zapálením středového kanálu, vyplněného snadno hořlavým materiálem, a doufat, že se oheň rozšíří i do spodních částí vsázky⁷. **Rozrovnání vsázky** je závislé na metodě zapalování. Při zapalování odspodu bez středového kanálu může být palivo rozrovnáno takřka libovolně, pokud zachováme minimum prázdných prostorů a mezer mezi palivem. Při zapalování pomocí středového kanálu je nutné palivo vyskládat systematicky buď svisle, nebo vodorovně, ale s cílem zachovat středový průduch. Uzavření otvoru jámy po zapálení vsázky za účelem omezení přísunu vzduchu může být provedeno různými technikami a materiály. Základní dvě techniky jsou pomocí **stabilního roštu** a **vertikálně posuvného roštu**. První typ roštu by měl obsahovat podpěrné prvky (kulatiny) a oba typy roštu by měly využívat izolační materiál (zeminu, listí, kameny, drny, dřevo, atd.), jak dokazují pozůstatky v zásypu některých archeologických nálezů jam nebo historické zprávy. Další možností u jam s malým průměrem a velkou hloubkou je využít postup pálení bez izolace s kontinuálním doplňováním paliva do vyhořelé vsázky (viz kapitola historické podklady), dokud se nezuhlí všechno palivo.

experiment ⁸	zápal	vsázka	zařízení	průměr (cm)	výška (cm)
J1	od spodu	horizontálně a svisle ve vrstvách	Bubeneč	80	145
J2	od spodu	horizontálně ve vrstvách	Bubeneč	80	145
J3	od spodu	horizontálně ve vrstvách	Bubeneč	80	145
J4	od spodu	horizontálně ve vrstvách	Bubeneč	80	145
J5	od spodu	horizontálně ve vrstvách	Bubeneč	80	145
J6	od spodu	horizontálně ve vrstvách	Bubeneč	80	145
J7	od shora	horizontálně paprskovitě	Kellerberg	100	120
J8	od shora	vertikálně	Bubeneč	80	145
J9	od shora	vertikálně	Kellerberg	100	120
J10	od spodu	vertikálně	Bubeneč	80	145
M1	od středu	vertikálně ve dvou vrstvách	vlastní	160	105
M2	od středu	vertikálně v jedné vrstvě	vlastní	150	90

Tabulka 3: Technologické postupy, typ a velikost zařízení uplatněných při experimentech

Všechny experimenty byly uskutečněny v srpnu v roce 2009 a 2010. Počasí v době provádění experimentů bylo velmi různorodé, převládalo polojasno s občasnými bourkami a deštěm, vítr převážně mírný JV s teplotami přes den okolo 25 °C. Samotné počasí mělo velký vliv na průběh pyrolýzy a dokumentaci experimentů. Nicméně pokud se nejednalo o souvislé vytrvalé deště jako při M2 nebo nárazové větry, nebylo nutné se těmito vlivy nijak zvlášť zabývat, ale brát je jako vedlejší faktory ovlivňující průběh procesu.

Při experimentech bylo použito výhradně březové dříví, pokácené a nařezané motorovou pilou na 30–50 cm dlouhé špalky s půlročním až ročním předstihem, které byly ponechány nepříkryté ve štosech

volně doschnout. Většina dřeva pro výpal J1 J6 byla v důsledku špatného uložení na místech bez kůry značně napadená dřevokaznou houbou a silně provlhlá. Část špalků byla měsíc před pálením rozštěpána na 1/5 polena a srovnána do štosů, kde na slunci doschla. Březové dřevo pro ostatní experimenty bylo poměrně dobře vyschlé.

experiment	druh dřeviny	stáří stromu	velikost – průměr/délka	poznámka
J1	bříza	20–40 let	8–13 cm/30–50 cm	suché, lehce trouchnivé
J2	bříza	20–40 let	do 8 cm/30–50 cm	suché, lehce trouchnivé
J3	bříza	20–40 let	do 8 cm/30–50 cm	navlhle, lehce trouchnivé
J4	bříza	20–40 let	do 8 cm/30–50 cm	navlhle, lehce trouchnivé
J5	bříza	20–40 let	do 8 cm/30–50 cm	20 % J1, navlhle, lehce trouchnivé
J6	70 % bříza, 30 % jasan	20–40 let	do 8 cm/30–50 cm	suché, bříza lehce trouchnivá
J7	bříza	15 let	do 7 cm/35–45 cm	káceno na jaře 2010, suché
J8	bříza	15 let	do 10 cm/35–45 cm	káceno na jaře 2010, suché
J9	bříza	15 let	do 10 cm/15–50 cm	50 % tvořila vsázka z J7, suché
J10	bříza	15 let	do 8 cm/35–45 cm	50 % tvořila vsázka z J8, suché
M1	70 % bříza, olše, jasan	10–20 let	do 10 cm/40–55 cm	káceno na jaře 2010, suché
M2	olše, vrba, jasan	10–20 let	4–9 cm/30–70 cm	káceno na jaře 2010, suché

Tabulka 4: Druh a vlastnosti použité dřeviny

Experiment J1

Pálení předcházelo vyhloubení jámy a příprava dřeva pro zuhlení. Výkop jámy č. 1 byl proveden s měsíčním předstihem a dokončen bezprostředně před prvním experimentem. Válcová jáma o shodných rozměrech s archeologickou předlohou z Prahy-Bubenče byla vyhloubena střídavě dvěma osobami kovovou lopatkou celkem za 12 hodin. Práce byla znesnadňována stísněným manipulačním prostorem v hloubce pod 70 cm a kamenitým šterkoslínovým podloží. Profil vyhloubené jámy byl následovný: 20 cm humusovitá vrstva, 50 cm jílovitá vrstva a 75 cm šterkoslínové podloží.

18.–20. 8. 2009, jáma č. 1. V **11:15** byl rozdělán oheň na dně jámy pomocí březové kůry a smrkového chvoje a za přikládání menších polen plameny ohně postupně zaplnily celou jámu. Oheň se vyznačoval dobrým tahem, občasné přerušovaným srážením větru (Obr. 15). V **11:50** byly stěny pece rovnoměrně vysušené, oheň nedýmal a plameny šlehal do výšky 50 cm nad zem. Celkem bylo vsazeno přibližně 0,2 m³ březového dřeva, poslední vsázka byla tvořena 10 neštípatelnými březovými poleny o délce 40 cm o maximálním průměru 10 cm. **12:45** Na žhnoucí polena a uhlíky o síle 25 cm v kotlovité nístěji se postupně začala vrstvit polena určená k zuhlení. Jeden člověk polena vhažoval a druhý je dlouhým bidlem pečlivě rozrovnával ve vrstvách na sebe. Za střídavého hoření a dýmání se pec dorovnala až po vrch. Polena o délce 25–35 cm byla ve spodních 2/3 jámy rovnána ve vodorovné poloze ve vrstvách, které se vždy o 90° překrývaly. Horní třetina pece byla vyskládána svislými poleny o délce 45 cm. **13:03** Jáma je naplněná

po vrch dřevem, dýmá stálým bílým štiplavým kouřem, pouze na východním okraji jáma nedýmá, ale viditelně nasává vzduch. Tento jev je zapříčiněn pravděpodobně špatným rozrovnáním polen nebo povětrnostními podmínkami. **13:10** Vrchní otvor byl zarovnán 8 vyschlými jasanovými kulatinami o průměru 8–12 cm a délce 130 cm, mezi kterými byly ponechány 3 cm mezery. Na tento rošt byla položena vrstva listnatých větví, která zabránila následnému propadávání jílové mazanice a která posloužila jako poslední izolační vrstva. Do této hliněné 4 cm vrstvy bylo rovnoměrně po celém povrchu vytvořeno 23 otvorů o průměru 3 cm pro nasávání vzduchu a uvolňování dýmu, nezbytného pro zuhlení vsázky. Proces pálení byl pravidelně regulován otvory v roštu v závislosti na vyhodnocení základních ukazatelů (barva kouře, množství kouře a uvolňované teplo v závislosti na čase). Hustý nažloutlý štiplavý dým je nahrazován slabším bílým dýmem. **14:30** Ve středu roštu utěsněno mazanicí 8 průduchů a ponecháno 15 po obvodu roštu pro docílení lepší cirkulace vzduchu. V souvislosti s občasným východním větrem, který srážel dým zpět do jámy, jsme vyskládali 0,5 m vysoké zástěny ve vzdálenosti 1 m po obvodu jámy z naštípaného dřeva. V těsné blízkosti vzduchových průduchů se kvůli uvolňovanému teplu nedá udržet ruka. Kouř pouze mizivý. Východní strana v souvislosti s proudícím větrem sloužila k nasávání vzduchu a neuvolňovala žádné teplo. **16:00** Jáma neprodukuje téměř žádný dým, pravděpodobně v důsledku zastavení pyrolýzy dřeva. Následně byly uvolněny všechny dymníky a téměř okamžitě jáma začala produkovat velké množství bílošedého dýmu. **21:30** V plášti roštu zůstalo pouze 5 průduchů na východní straně, slabý štiplavý dým měl ve tmě špatně rozeznatelné zabarvení. **Druhý den v 01:15** bylo zbývajících 5 průduchů utěsněno, předtím produkovaly už jen neznatelné množství dýmu. Celý hliněný kryt byl pokropen vodou a kompletně utěsněn. **Třetího dne v 08:00** byla z vychladlého roštu odhrnuta vysušená, nikoli vypálená hlína a zbytky seschlých listnatých větví spolu s dřevěnými kulatinami, na spodní straně s vrstvou usazeného dehtu. Objem vsázky poklesl o 40 cm pod okraj jámy. Dále lze zde spatřit množství mazanice, která propadla z hliněného roštu, a dočerna opálená nezuhlená polena na povrchu. Obsah jámy byl postupně jednou osobou vyprazdňován pomocí plechového kbelíku, do kterého byly v předklonu nabírány kusy uhlí a nezuhleného dřeva z jámy a vyprazdňovány v okolí jámy. Vypálené kusy dřevěného uhlí se nacházely v kuželovitém útvaru v hloubce 50 cm uprostřed jámy a směrem ke dnu jich přibývalo. Po krajích jámy se až do hloubky 120 cm nacházela nezuhlená polena, která měla v lomu hnědou barvu. Jáma a její objem byl při vyprazdňování „vlažný“ a jednotlivé kusy se daly vzít bezpečně do ruky. Celkem bylo vyjmuto 0,306 prm (prostorové metry) nezuhleného dřeva, 0,125 prm vypáleného dřevěného uhlí o velikosti lískového oříšku až celých polen a ze dna okolo 0,020 prm mouru promíšeného s hlínou a malými kousky uhlí. Vypálení jámy do červeného žáru bylo znatelné pouze ve spodních 50 cm a to do hloubky 1 cm. Celý vnitřní plášť jámy byl rovnoměrně pokryt černou vrstvičkou usazeného dehtu.

Experiment J2

20.–21. 8. 2009, jáma č. 1. Počasí bylo příznivé, nevětrné a teploty se přes den pohybovaly okolo 30 °C na slunci. Experiment proběhl ihned po vyprázdnění jámy po předchozím výpalu. **12:00** V jámě byl rozdělán oheň pomocí březové kůry a postupně bylo přihazováno smrkové chvoji a větší kusy dřeva. Předehev jámy a vytvoření požadovaného žhavého podkladu probíhal podstatně rychleji než při prvním experimentu, proto stěny jámy již byly vysušené. Oheň hořel pravidelným plamenem, vydával charakteristické hučivé zvuky a sahal až 1 m nad okraj jámy. **12:55** Bylo docíleno na dně jámy rovnoměrného

žhnoucího podkladu o síle 25 cm s plameny do výšky maximálně 1 metru. Celkem bylo spotřebováno na předehev 0,120 prn méně kvalitních a neforemných kusů březového dřeva. Začalo se s plněním jámy dřevem určeným k zuhlení. Dřevo je z důvodu snadnějšího zuhlení naštipáno na menší kusy o délce 25–40 cm o max. průměru 6 cm. Dva experimentátoři pracují střídavě mezi hořením a dýmem, jeden vhazuje a druhý opět dlouhým bidlem rozrovnává polena v jámě. Při vodorovném rozrovnávání polen byly záměrně ponechány malé mezery mezi poleny a stěnou jámy. **13:45** Dřevo je s malými mezerami vyskládáno až po okraj jámy, horní vrstva o síle 50 cm je složena pouze z nezuhlených polen z prvního výpalu, které byly před pálením naštipány na poloviční rozměr. Vzduch je stále pravidelně nasáván po obvodu celé jámy, toho bylo docíleno správným rozrovnáním polen. Obsah jámy již nehoří plamenem, ale velice hustě žlutobíle dýmá. Stejným způsobem jako u předchozího experimentu byl vytvořen rošt s 30 vzduchovými průduchy o průměru 4 cm rovnoměrně po celém roštu. **16:30** Ve středu roštu utěsněny 3 průduchy, které produkovaly pouze slabý namodralý dým a velké množství tepla, značící rychlejší průběh procesu ve středu jámy. **18:00** Jáma z 10 otvorů po obvodu produkuje jemný bělavý dým. **22:30** Jáma samovolně přestala produkovat dým, to bylo znamení o ukončení procesu pálení. Bylo utěsněno zbývajících 6 průduchů, hliněný rošt byl pokropen vodou a utěsněny všechny otvory. **Druhý den v 17:45** byl sejmут již studený izolační rošt. Část jasanových kulatin z roštu byla ve střední části nad jámou do poloviny průřezu zuhlena. Vsázka poklesla 50 cm pod okraj jámy, veškeré viditelné dřevo promíšené s propadlou hlínou bylo kompletně přeměněno na dřevěné uhlí, zachovalo si navíc i původní skladebnost z rozrovnání polen. V hloubce 110 cm se na krajích nacházelo 10 nezuhlených polen, které při vybírání začaly produkovat malé množství štiplavého kouře. Menší kusy uhlí, promíšené s hlínou a mourem ze spodních 50 cm jámy, byly vybírány fankou na dlouhé násadě a vysypány v těsné blízkosti po obvodu jámy. Na několika místech bylo nutné vodou kropit menší kousky žhnoucího uhlí. Při ručním vyprazdňování jámy v náklonu se z uhlí uvolňoval velice nebezpečný jemný popílek, který po vdechnutí dráždil dýchací cesty (Obr. 19). Celkem bylo vypáleno 0,238 prn dřevěného uhlí většího než 4 cm a 0,150 prn menších kusů dřevěného uhlí. Části polen, které byly při pálení pokryty březovou kůrou, byly do hloubky několika milimetrů neúplně zuhleny. Jáma dále obsahovala 0,032 prn nezuhlených polen a 0,024 prn mouru promíšeného s hlínou a drobnými zbytky uhlí. Jáma byla kompletně začerněná usazenými zplodinami a vypálení stěn nebylo po předchozím výpalu zvětšeno, zbylý povrch jámy byl ohněm poznamenan vrstvičkou hnědého opálení.

Experiment J3

20.–22. 8. 2009, experiment proběhl souběžně s experimentem J2, ale v **jámě č. 2**. Na hloubení druhé jámy se podílel jeden muž a s malými přestávkami ji obdobným způsobem jako jámu č. 1. dokončil celkem za 16 hodin. Půdní profil jámy byl shodný s profilem jámy č. 1. **15:45** Na dně jámy byl rozdělán oheň a v **17:15** již byla na dně jámy vytvořena žhnoucí vrstva bez plamenů o síle 25 cm. S přestávkami se začínají pokládat polena. **17:55** Jáma zaplněna do 3/4 březovými poleny o délce 25–40 cm a max. průměru 6 cm. Jáma střídavě dýmá hustým žluto bílým kouřem a občasně se pulzovitě vznítí oheň. Tento jev je zapříčiněn použitím lehce navlhělého dřeva v kombinaci s čerstvě vyhloubenou jámou. **19:00** Otvor jámy byl překryt svisle posuvným kruhovým roštem o průměru 75 cm. Posuvný rošt byl použit za účelem zjištění rozdílných vlastností při samovolném a nuceném propadání vypáleného dřevěného uhlí.

Dřevěný rošt se skládal ze 4 kulatin o průměru 10 cm o různých délkách a dvou půlkulatin, které byly napříč spojeny hřeby s kulatinami, mezi kterými vznikly 4 cm mezery. Na tento posuvný dřevěný rošt byly položeny travou dolů 4 drny o síle 20 cm, které vytvářely izolační vrstvu s průduchy po celém obvodu drnů a ve středu jámy. Posuvný rošt byl pravidelně sešlapáván spolu s klesající vsázkou vypáleného uhlí. **21:25** Posuvný rošt klesl již o 50 cm z počáteční pozice. Z 10 průduchů stále vycházel hustý bílý dým. **Druhý den v 01:00** byl stav neměnný, stálý dým neznatelné barvy, nad všemi průduchy stejná teplota, nedala se nad nimi udržet ruka. **08:00** Po třech hodinách bez kontroly bylo možné průduchy pod roštem spatřit rozžhavenou vrstvu uhlí do žluta. JV strana roštu se propadla o 25 cm, pravděpodobně proto, že zde byl téměř celou dobu nasáván vzduch do jámy a tím byl proces urychlen. Teplota v okolí jámy byla velmi vysoká, navíc vyhořel i veškerý dehet ze stěn nad roštem. Propadlé místo na JV straně bylo utěsněno drnem, rošt byl sešlápnutím posunut a všechny otvory byly zamazány mazanicí. V okolí jámy byla po utěsnění cítit slabá nasládlá vůně, signalizující nejspíše dokončení procesu pyrolýzy. **Třetí den v 08:40** došlo k vyprazdňování již vychladlé jámy. Drnový kryt roštu částečně shořel a rošt byl z velké části zuhlen (jednalo se o čerstvě pokácené jasanové dřevo o průměru 10 cm), uhlí se nacházelo 70 cm pod povrchem. Objem jámy byl vybírán stejným způsobem jako při předchozích experimentech. Uhlí se zdálo být velice kvalitní a kompletně vypálené, pouze v hloubce 100 cm se nacházela 4 nezuhlená polena. Celkem bylo vyjmuto 0,342 prm dřevěného uhlí od velikosti vlašského ořechu až po celá zuhlená polena. Jáma navíc obsahovala velké množství mouru s hlínou a drobnými zbytky dřevěného uhlí, celkem 0,059 prm a 0,012 prm nezuhlených polen. Znatelné stopy propálení žárem nesla jáma pouze na jednom místě. V hloubce 50–60 cm pod okrajem byl po celém obvodu jámy dočervena vypálen pruh do hloubky 2–3 cm, způsobený ranním vznícením vypáleného uhlí v jámě. V nížeji jámy byly až do výšky 50 cm stěny poznamenány hnědým propálením o síle 1 cm.

Experiment J4

22.–24. 8. 2009, jáma č. 1. Předehřev zpočátku klestím, později klacky a menšími poleny. Stěny jámy jsou po předchozích výpalech vysušené a částečně i vypálené. Ihned po zapálení se oheň projevuje velice dobrým tahem, plameny šlehají nad úroveň země. Předehřívá se lehce navlhými poleny, JZ vítr občas sráží plamen zpět do jámy. **11:05** Na dně jámy byla rozložena první vrstva polen, která byla oproti předchozím výpalům značně navlhlá z důvodu špatného uložení. **12:45** Jáma zaplněna do 2/3. Vzplanutí polen a možnost přehledného vhazování polen vyplňovaly dlouhé pauzy ostrého dýmání, zpomalující proces (Obr. 17). Plameny obcházejí dřevo po stěnách. Zdlouhavé rozrovnávání polen je zapříčiněno vlhkým dřevem, které pomalu chytá plamenem a zároveň tlakovou níží a deštivým počasím. Za stálého dýmání byla jáma systematicky doplněna dřevem po okraj až ve **14:45**. Při zhotovování podpěrné konstrukce stabilního roštu byly použity stejné kulatiny a shodná konstrukce roštu jako při experimentu J1 a J2. V celé ploše hliněného roštu bylo vytvořeno krátkými jasanovými klacky o průměru 4 cm 25 otvorů, které produkují středně silný jasně bílý dým.

19:00 Počet otvorů, které neprodukovaly dým byl omezen na 20. **Druhý den v 01:30** dým slábnul, bylo ponecháno pouze 11 průduchů po obvodu jámy. **03:20** Utěsněny všechny zbývající průduchy hlínou, celý rošt byl následně pokropen vodou a zamazány všechny otvory. Obsah jámy byl ponechán chladnutí.

Třetí den v 08:00 byl již povrch hliněného roštu chladný, ale nevysušený z důvodu častého kropení

vodou. Při rozebírání roštu bylo patrné, že ani ze spodní části hliněný rošt neproschnul a že podpěrná vodorovná polena jsou z větší části zuhlena (3. použití), v lomu bylo patrné, že si zachovávají hnědou dřevní hmotu pouze ve středu. Vsázka dřeva určeného k zuhlení poklesla o 45 cm pod okraj jámy, v zuhlené vsázce byla jasně pozorovatelná celá zuhlená polena v původní skladebnosti (Obr. 14 a 18). Větší vypálené kusy dřevěného uhlí byly vyjímány z jámy jednou osobou vleže nad jámou, ale pouze do hloubky 80 cm, dále pak pouze ze stoje pomocí kovové fanky na dřevěné násadě, jelikož se z vypáleného uhlí uvolňuje velké množství drobného popílku, který při blízkém styku dráždí dýchací cesty. Ve spodních 20 cm se nacházelo několik žhnoucích uhlíků, které byly po vyjmutí z jámy kropeny vodou. Jáma byla uvnitř vlažná, ve spodní části teplejší, ale po celou dobu bylo možno uhlí vybírat a třídít pouhou rukou. V 60 cm hloubky bylo nalezeno větší množství drobné do hněda vypálené mazanice. Stěny jámy jsou rovnoměrně pokryty černou dehtovou krustou a kompletně poznamenány žárem do hněda do hloubky 1 cm a stěny ve spodních 30 cm nesly stopy vypálení do červena a hloubky 5 cm. Uhlí bylo přebráno na větší a menší kusy, změřeno a uloženo v pytlích. Celkem bylo vyjmuto 0,411 prn dřevěného uhlí o velikosti lískového oříšku až celých polen, 0,017 prn nezuhleného dřeva a ze dna okolo 0,027 prn mouru promíšeného s hlínou a malými kousky uhlí.

Experiment J5

22.–24. 8. 2009, experiment probíhal souběžně s J4, ale v **jámě č. 2**. Po zapálení v **11:05** i přes nepřízeň počasí (deštivo, občasné silný JZ vítr), plameny okamžitě šlehaly až nad úroveň země, dobrý tah a cirkulace vzduchu v jámě. **11:51** Oheň v jámě byl zadušen špatně vhozeným polenem. Na žhnoucí podklad ze spálených polen o síle 20 cm se v **12:30** začalo s plněním jámy vsázkou dřeva určeného k zuhlení, ale hned po vhození první vrstvy dřeva se jáma zalila hustým štiplavým dýmem znemožňujícím další systematické vhažování a rozrovnávání polen. Po každé nové vrstvě dřeva se čeká na vznícení dřeva ve spodních partiích jámy (Obr. 17). **14:50** Narovnána poslední vrstva po vrch jámy sestávající z nezuhlených opálených polen z předchozího výpalu. Pro utěsnění otvoru byl použit rošt shodné konstrukce jako při J3, který byl překryt 3 drny s travnatou částí otočenou do jámy. Jasný bílý dým vychází po okrajích jámy a v mezerách mezi drny. Mezery mezi drny nebyly zamazávány hlínou. Po stlačení vahou jednoho člověka v **19:10** rošt poklesl o 20 cm. Mezery mezi drny, které uvolňovaly intenzivní bílý dým, se vymazaly mazanici. Byly ponechány 4 otvory po obvodu a jeden ve středu roštu o průměru 7 cm. **21:40** V průduchu na východní straně byly jasně vidět žhnoucí uhlíky. Rošt opět po stlačení klesl, ale ve východní části na 40 cm a v ostatních na 25 cm pod okraj jámy⁹. Po tomto nerovnoměrném vypálení byly ponechány pouze 3 průduchy na S, J a Z straně, ostatní byly utěsněny drnem a hlínou. **Druhý den v 03:30** jáma již jenom slabě dýmala, převážně na západní straně, ale proces byl ukončen utěsněním všech otvorů. Drnový rošt se svažoval k východní straně. Po utěsnění všech otvorů byl cítit slabý nasládlý závan. **Třetí den v 12:25** byl odkryt drnový kryt, pod kterým se nacházely nezuhlené zbytky dřevěného posuvného roštu, který okamžitě po vyjmutí z jámy začal hořet. Uhlí se nacházelo až v hloubce 55 cm, bylo vlažné a vyjímala ho rukama jedna osoba vleže nad jámou. V hloubce 95–120 cm se nacházela vrstva, která se skládala převážně z nezuhlených polen. Celkem bylo vypáleno 0,343 prn menších i větších kusů velice kvalitního uhlí. Na dně jámy a mezi uhlím se nacházelo 0,020 prn drobného uhlí (pod 1 cm), mouru a hlíny. S nevypálenou vrstvou dřeva stoupl i počet nezuhlených polen na 0,074 prn. Stěny jámy byly

kompletně vypáleny do hloubky 1 cm do hněda, navíc se zde nacházel pruh po předchozím výpalu v hloubce 50–60 cm, vypálený do červena.

Experiment J6

Tento experiment nebyl prováděn s cílem objasnění určitých výrobních postupů vedoucích k co možná nejvyššímu množství hmotného produktu, nýbrž měl posloužit jako demonstrace postupu, který by se měl ve výsledku přiblížit nálezovým okolnostem zkoumané technologie. Neboli budeme se snažit o vytvoření stejných podmínek, jejichž výsledek se bude co možná nejvíce shodovat s archeologickými nálezovými podklady.

24.–26. 8. 2009, jáma č. 1. Za slunečného, teplého počasí byl v **09:55** zapálen oheň na dně jámy, jedná se o 4. výpal v pořadí v tomto zařízení. **10:30** Vytvořen žhavý podklad o síle 25 cm na dně jámy. Postupovalo se stejně jako u předchozích výpalů, jáma byla postupně zaplňována rovnoměrnými vodorovnými vrstvami polen, které byly dlouhým bidlem rozrovnávány. Rovnání polen do jámy bylo zpomalováno silným štiplavým dýmem. **13:00** Jáma po vrch zarovnána dřevem, na jižní straně byl evidentně nasáván vzduch do jámy. Jako opěrná konstrukce hliněné izolační vrstvy posloužily stejné, částečně již zuhlené kulatiny, jako při J1–J4. Pro procesu vypálení uhlí a následném vznícení bylo v roštu vytvořeno 15 otvorů o průměru 8 cm. **15:45** Krátce po sobě se objevily dva impulzivní ohnivé šlehy, které se dostaly až několik cm nad rošt, zapříčiněné nadbytečným přísunem vzduchu a vznícením dřeva/uhlí. Otvory v roštu bylo jasně vidět, že dřevěná vsázka poklesla o 50 cm pod okraj jámy a že uvnitř hořely malé plameny. Od **16:00** proces zuhlení pokračoval plynulým bílým dýmem. **17:10** Jáma přestala dýmat, skrze otvory v roštu byly téměř po celé ploše viditelné červeně žhnoucí kusy uhlí, které již ale nehořely plamenem. **17:30** Následkem propálení již předtím částečně zuhlených podpěrných jasanových kulatin se propadla část (15×15 cm) hliněného roštu do jámy. Postupně se začal propadat rošt i na jiných místech. V **18:00** se rošt již kompletně zřítíl do jámy, po okraji jámy zůstalo několik opálených konců podpěrných kulatin a zbytky hliněného krytu. Vnitřek jámy byl pokryt vrstvou dřeva a celistvých segmentů ze zříceného roštu, pod kterými červeně žhnulo vypálené dřevěné uhlí. Z jámy vycházel bílomodrý slabý štiplavý kouř. **22:00** Uvnitř jámy po celé ploše silně do červena žhnulo dřevěné uhlí a slabým plamenem dohořovaly zbytky dřevěných podpěr roštu. **Druhý den v 16:00** dřevěné uhlí v jámě téměř vyhořelo, na dně se nacházely zbytky žhnoucího uhlí a kusů hliněného roštu, pokryté vrstvou popela. **Třetí den v 08:00** byla jáma již vychladlá, veškeré dřevěné uhlí shořelo a na dně jámy se nacházejí pouze pozůstatky hliněného roštu a silná vrstva popela. V tomto stavu bylo výrobní zařízení ponecháno nepřikryté volnému působení prostředí a přirozené destrukci po dobu jednoho roku.

12. 8. 2010 došlo k ohledání stavu a změn na pyrotechnickém zařízení. Toto pozorování bylo stíženo pozdějšími neznámými zásahy do zařízení s cílem rozdělení ohně a nejspíše pokusem o vypálení vlastního dřevěného uhlí. Stěny jámy byly v hloubce 70 cm rozšířeny z průměru 80 cm na 105 cm a až do hloubky 95 cm byly stěny pokryty vrstvou černého dehtu. Nová hloubka jámy byla 95 cm, místo 145. Přistoupilo se k postupnému odkrývání jednotlivých vrstev v jámě. Svrchní vrstva sestávala ze z dočervena vypálené hlíny, promísené v poměru 1 : 1 s kusy dřevěného uhlí (2–5 cm) a na spodu této vrstvy několik nedopálených klacků (průměr 5 cm). Druhá 5 cm silná vrstva se skládala z nevypáleného jílu a kamenů, nejspíše opadaného ze stěn. Třetí vrstva o síle 9–11 cm obsahovala pouze sypkou dočervena vypálenou

hlínu bez pevných kusů, interpretované jako pozůstatky zborceného roštu. Poslední vrstva měřila 2 cm a rovnoměrně pokrývala kotlovité dno jámy, skládala se převážně z drobného šedého popílku a menších kusů dřevěného uhlí do 3 cm. Na místech s původním profilem se zachovalo vypálení hlíny dohněda a to do hloubky 4 cm. Navíc kotlovitá nístěj ve spodních 50 cm nesla stopy propálené dočervena až do hloubky 8 cm. Samotné dno bylo poznamenáno žárem dohněda do hloubky až 3 cm.

Experiment J7

13. 8.–15. 8. 2010, jáma č. 1. V důsledku pozdějších zásahů, kdy došlo k destrukci stěn, bylo nutné tvar jámy upravit pro další experimenty. Po provedení průzkumu vypálení a obsahu v zásypu jámy byl rozšířen průměr jámy na 100 cm a hloubka upravena na 120 cm s kotlovitým dnem. Tento tvar a rozměry byly přizpůsobeny nálezům uhelných jam v Kellerbergu (Obr. 1, 13). Tento rozšířený typ jámy umožňoval pozdější srovnání s jámou typu Bubeneč.

Stěny jámy byly před samotným plněním vsázkou sušeny pomocí rozdělaného ohně na dně jámy po dobu 3 h. Druhý den byla na dno jámy položena 3 polena, která plnila funkci podkladového roštu. Vsázka polen byla rozrovnána paprskovitě od středu, ve středu byl ponecháván otvor o průměru 17 cm, který byl vyplněný smrkovým chrastím a březovou kůrou. Mezery mezi poleny byly vyplňovány drobnějšími kusy dřeva. Paprskovitě rozrovnávaná polena se s přibývajícím množstvím měla tendenci dostávat do svislé polohy, proto byl vzniklý prostor při stěnách po obvodu vyplňován vodorovně kladenými poleny. **11:18** Zapálen středový komín vsypáním žhavých uhlíků, téměř okamžitě se vznítil obsah komínu a plameny šlehaly až do výšky 50 cm. Vyhořelé palivo v komínu bylo průběžně doplňováno drobnými kusy dřeva a oheň přecházel do hustého dýmu. **11:50** Obsah komínu začal opět hořet plamenem, byl zaplněn několika menšími poleny a přistoupi se k utěsnění vsázky. Přes otvor se položilo 8 kulatin o průměru 12–15 cm, následovala vrstva smrkového chvojí a mazanice. Po obvodu izolačního roštu bylo vytvořeno 18 průduchů o průměru 4–5 cm, které plynule nasávaly vzduch a produkovaly sytý šedý dým. **16:07** Kvůli ubývajcímu množství dýmu, nahrazeného uvolňovaným teplem, se přistoupi k redukci otvorů na 8, které produkovaly šedomodrý kouř. **19:00** Došlo ke zborcení roštu na JV kraji v důsledku kompletního zuhlení podpěrné dřevěné konstrukce. Hliněná část roštu byla ponechána uvnitř jámy, ale vzniklý otvor byl utěsněn mazanicí. **19:15** Celý rošt se zborstil do jámy, vzniklé otvory byly utěsněny mazanicí a obsah jámy byl ponechán chladnout. **Třetí den v 17:00** se začal vybírat již chladný obsah jámy. Vsázka poklesla o 25 cm a dřevěná část roštu byla kompletně zuhlena. Dřevěné uhlí se nacházelo pouze v blízkosti komínu a to do hloubky pouhých 75 cm (Obr. 20). Dřevo při stěnách jámy bylo navlhle a nezuhleno s výjimkou jižní strany, kde byl proces pyrolýzy urychlen v důsledku proudění mírného větru. Od hloubky 75 cm až na dno se zachovalo i nespálené chvojí ve středovém komínu. Stěny jámy byly po výpalu silně provlhle, místy pokryté dehtem, ale beze stop tepelného postihu.

Experiment J8

13. 8.–16. 8. 2010, jáma č. 2. Jáma byla při roční přestávce přikryta dřevěnými prkny. Její tvar ani okraje nebyly nijak výrazně pozměněny. Pouze ve stěnách jámy byl na několika místech aktivitou hlodavců vytvořen systém chodeb o hloubce a šířce 5–12 cm. Na dně jámy se drželo 15 cm vody. Povrch stěn byl

pokryt slabou vrstvičkou dehtu. Propálení stěn po předchozích výpalech do červeného žáru bylo čitelné ve vrstvě v hloubce 40–70 cm do hloubky 3 cm a v nížeji v hloubce 120–145 cm do hloubky 5–7 cm.

První den byla jáma vysušena hořícími poleny, celkem 10 hodin. **Třetí den** se přistoupilo k zaplnění jámy palivem, které bylo vyskládáno vertikálně v třech vrstvách, ve středu byl zachovaný komín o průměru 17 cm, vyplněný snadno hořlavým materiálem (chvojí, štipky, březová kůra). Nejslabší polena se nacházela v blízkosti komínu a při stěnách jámy. Plnění jámy bylo přerušováno občasným deštěm (Obr. 21). **12:10** Přes otvor jámy se položilo 7 kulatin z čerstvě nařezaných jasanů o průměru 12 cm s mezerami 4 cm. **12:21** Do středu komínu se vysypaly 2 lopaty žhnoucích uhlíků, dřevěné kulatiny byly dočasně odstraněny. Obsah krále se velice dobře vznítil a průběžně byl doplňován stále novým palivem. **12:40** Plamen z komínu nahrazen štiplavým žluto bílým dýmem a otvor byl opět překryt kulatinami a utěsněn pouze mazanicí silně promíšenou plevami. Vrstva mazanice o síle 4 cm byla vecpána i do mezer mezi jasanovými kulatinami, které zabránily jejímu propadávání. Po obvodu roštu bylo vytvořeno 10 otvorů o průměru 5 cm. **19:00** Jáma produkuje sedmi otvory stálý intenzivní šedobílý dým, zejména na severní straně, protože z jižní strany je po svahu nasáván vzduch. **Třetí den v 01:30** obsah v jámě silně žhnul a produkoval pouze nepatrné množství dýmu, přistoupilo se k utěsnění všech otvorů v hliněném izolačním roštu. **Čtvrtý den v 9:00** se přistoupilo k vyjmutí produktu z jámy. JV strana vsázky poklesla o 60 cm, povrch dřevěného uhlí byl silně opálený a na SZ poklesla vsázka o 15 cm. Dřevěná vsázka byla zuhlena pouze při JV stěně a to až do hloubky 130 cm v důsledku urychlení pyrolýzy v důsledku přístupu většího množství vzduchu. Polena v blízkosti komínu nebyla zuhlena, pouze silně opálená. Získané dřevěné uhlí bylo horší kvality v důsledku druhotného přepálení a zdálo se, že i měrná hmotnost byla o mnoho menší než u produktů jiných experimentů.

Experiment J9

16. 8.–18. 8. 2010, jáma č. 1. Ze zkušeností z předchozích experimentů byl zeminou vyrovnán terén do vodorovné polohy v blízkém okolí otvoru jámy, která se nacházela v mírném svahu a kudy byl pravidelně nasáván vzduch a způsoboval nekontrolovatelné a nerovnoměrné vypálení vsázky. Na dně jámy byla vytvořena vrstva snadno hořlavého materiálu (smrkové kletí, březová kůra). Na tuto vrstvu byla ve třech vertikálních vrstvách vyrovnána vysušená březová polena z J7 a J8. Ve středu vsázky byl až na dno vytvořen průduch o průměru 18 cm, vyplněný kletím. **9:50** Vsypáním žhnoucích uhlíků byl zapálen obsah komínu, chvílemi jasně slyšitelný tah ohně, doprovázený hustým nažloutlým dýmem. **10:20** Proběhlo utěsnění otvoru 8 kulatinami o průměru 8–15 cm a pokrýváním mazanicí silně promíšenou plevami od středu směrem ke krajům. Po utěsnění roštu s 15 průduchy se barva dýmu změnila na sytě bílou. **13:11** Průduchy v roštu bylo možné spatřit na jižní straně plameny, způsobené nejspíše přebytkem vzduchu. Po celou dobu jáma produkuje velké množství bílošedivého, velmi štiplavého dýmu. **18:00** Utěsněny otvory v JV straně roštu, protože se uvnitř vsázky objevily žhnoucí uhlíky. **Druhý den v 01:15** byl proces pyrolýzy ukončen, protože zbývajících 8 průduchů již neprodukovalo dým. **Třetí den v 8:40** byl již dokonale vychlazený obsah jámy ručně vyprázdněn, vsázka poklesla o 40 cm. Nezuhlené dřevo se nacházelo pouze po okrajích jámy, dřevěné uhlí se vyskytovalo pravidelně ve válcovitém útvaru o průměru 80 cm až na dno. Dřevěné uhlí bylo zejména ve středu jámy silně opálené a vyskytovalo se ve velikostech od celých polen až po drobné kousky. Stěny jámy nebyly po tomto experimentu nijak nově poznamenané.

Experiment J10

17. 8.–18. 8. 2010, jáma č. 2. Jako u J9 byl vyrovnán terén vytvořením hliněného náspu v blízkém okolí jámy. Na dno suché jámy byla položena 3 polena, která spolu se smrkovým chrastím měla vytvořit prostor pro snazší zapálení vsázky. Na tuto vrstvu byla ve třech řadách svisle vyskládána polena s co možná nejmenšími mezerami, směrem od středu se zmenšujícím průřezem. Ve středu jámy byl ponechán prázdný komín procházející celým tělesem vsázky až na dno, o průměru 13 cm. **13:05** Proveden zápal vsázky vysypáním žhavých uhlíků komínem až na dno jámy. Po rozhoření ohně na dně jámy se do prázdného komínu vsunula smrková kulatina o délce 1 m a průměru 12 cm, která byla určena k zuhlení. **14:30** Po delší pauze byl položen izolační rošt sestávající z jasanových kulatin o průměru 10–15 cm a hliněné mazanice s 15 průduchy po obvodu roštu. **17:00** Jáma produkuje stálý koncentrovaný hustý bílý dým. **23:00** Došlo k úplnému utěsnění všech otvorů v plášti jámy, protože průduchy na JV straně bylo jasně viditelné žhnutí vypálené vsázky. **Druhý den v 15:10** byl vybrán obsah jámy. Část podpěrné konstrukce roštu byla zuhlena a po odkrývání se zřítila. Vsázka poklesla o 20 cm, na JV straně o 40 cm. Dřevěné uhlí se v jámě nacházelo v kuželovitém útvaru směrem od spodu se rozšiřujícím. U stěn, zejména u dna, se nacházelo množství nezuhleného dřeva. Zajímavé bylo pozorování, že 12 cm silná smrková kulatina byla kompletně zuhlena a v kompaktním stavu se nenacházela nikoliv ve středu zuhlené vsázky, ale zbortila se směrem k JV stěně, kde byl značný úbytek vypáleného uhlí. Vypálené dřevěné uhlí se jevílo jako velmi kvalitní a na rozdíl od J7–J9 nebylo druhotně opáleno. Stěny jámy nenesly žádné nové stopy po působení ohně, ale byly souvisle pokryty vrstvou dehtu.

Experiment M1

Za účelem porovnání výtěžnosti dřevěného uhlí, případně kvality a časové náročnosti při pálení dřevěného uhlí, jsme uskutečnili i dva experimentální výpaly dřevěného uhlí v milířích menších než 1m³. Postup při pálení těchto milířů byl opačný, než jaký je všeobecně uváděn v historické literatuře o pálení dřevěného uhlí v milířích. Postup při těchto dvou experimentech vycházel z nepodloženého faktu, že pálení dřevěného uhlí pro malé potřeby pravěkých metalurgů bylo provozováno pouze v malých objemech pro okamžité uspokojení potřeby. Můžeme předpokládat, že pálení probíhalo následovně: byl rozdělán malý oheň, který byl postupně obkládán dřevem a v určitou chvíli pokryt izolačním krytem zamezujícím přísunu vzduchu. Takto lze tento postup praktikovat, ale pouze do omezené velikosti vsázky, která se pak stává tímto postupem nezvladatelná.

Experimenty byly uskutečněny na zapuštěné terase v JV svahu, na místě, kde v minulosti proběhlo již několik výpalů milířů (Dragoun, Matoušek 2004; Kmošek 2008). Na „place“ došlo nejprve k vyrovnání povrchu, odstranění drnů a vytvoření mírně kuželovitého podkladu pro lepší cirkulaci vzduchu. Při těchto úpravách terénu byly objeveny přibližně tři do červena vypálené vrstvy o síle 1 cm po předchozích výpalech milířů.

14. 8.–17. 8. 2010

V **15:24** byl rozdělán uprostřed placu menší oheň a v **16:30** se přistoupilo k rozrovnání dřeva do požadovaného kuželovitého tvaru. **17:05** Dokončeno rozrovnáním dřeva ve dvou řadách, milíř dosahoval výšky 105 cm

a průměru 155 cm, neodpovídal požadovanému kuželovitému tvaru, ale spíše paraloidu. V průběhu rovnání bylo nutné prolít rozrovnávané dřevo vodou (celkem 30 l), aby se zabránilo nekontrolovatelnému vznícení milíře. Na vyskládané dřevo byla rovnoměrně rozložena vrstva čerstvého smrkového chvojí, které bylo pokryto vrstvou zeminy, která jenom obtížně držela na plášti milíře, protože jsme zvolili příliš strmý tvar (Obr. 22). Po zakrytí pláště milíře zeminou bylo v **18:40** vytvořeno 8 otvorů o průměru 4 cm ve výšce 1 m, které produkovaly hustý bílý dým. **19:45** Na západní straně pláště ve výšce 1 m se propadl izolační kryt, vzniklý otvor byl vyplněn jedním polenem a zakryt zeminou. Průběžně byl celou noc plášť milíře lopatou stloukán, aby se zabránilo dalším nekontrolovaným propadům. Průduchy byly pravidelně obnovovány a ty, které produkovaly pouze teplo místo dýmu, byly utěšňovány a nahrazovány novými v další řadě. **Druhý den v 8:30** bylo ve výšce 30–40 cm nad zemí vytvořeno 15 malých průduchů. **15:30** Utěšněny zbývající průduchy u placu, které již neprodukovaly dým. Následně byl hliněný plášť pokropen vodou a byly utěšněny všechny otvory. Výška milíře poklesla na 70 cm a průměr zůstal stejný. **Třetí den ve 20:13** se přistoupilo k rozebrání milíře. Z povrchu byl sejmut hliněný plášť, místy i se zachovalým chvojí a po částech se přistupovalo k vyhrabování vypáleného dřevěného uhlí a nedopálených polen. Na několika místech dřevěné uhlí po rozhrnutí na ploše žhnulo a muselo být kropeno vodou (celkem 30 l). Kromě severní strany se u pláště a při zemi zachovala nezuhlená polena. Hliněný povrch „placu“ na sobě nenesl žádné stopy po propálení žárem.

Experiment M2

17. 8.–18. 8. 2010

Experiment proběhl na stejném místě jako M1. **9:00** Rozdělán menší oheň (plameny do výšky max. 30 cm) a v **10:40** se začalo s obkládáním ohniště dřevem. Do vsázky byly použité zejména našťipané dlouhé kulatiny do 70 cm, které byly vyskládané v jedné vrstvě a tvořily komolý kužel (Obr. 23). Všechny mezery a prázdné prostory mezi kulatinami byly vyplněny menšími kusy dřeva. **10:55** Začalo se s pokrýváním dřeva chvojí a zeminou o síle 3–5 cm. Hotový milíř i s pláštěm byl vysoký 90 cm a o průměru 150 cm. V průběhu rovnání vsázky a pokrývání izolační vrstvou milíř dýmal intenzivním štiplavým žlutobílým dýmem. **11:29** Po dokončení izolačního krytu bylo vytvořeno 9 průduchů ve výšce 70 cm. Intenzivní déšť a tlaková níže komplikovaly proces pyrolýzy. Průduchy se postupně přesunuly až do spodních partií a **druhý den v 01:00** za slabého dýmu byl celý povrch milíře utěšněn. Proces pyrolýzy byl ukončen předčasně kvůli intenzivním deštům, které znesnadňovaly kontrolu a správný průběh výpalu. **9:45** Přistoupilo se k rozebírání milíře. Vsázka ve středu a u vrcholu milíře byla kompletně zuhlená, pouze u pláště směrem k zemi přibývalo nedopálených dřev (Obr. 24). Žhnoucí místa byla kropena vodou a uhlí bylo přebíráno od zeminy a nedopálených dřev. Ani tento výpal nezanechal na hliněném podkladu žádné stopy propálení.

Vyhodnocení výsledků

Ve 12 uskutečněných experimentech, jejichž výsledky jsou souhrnně prezentovány v tabulce 5, jsme se dostatečně seznámili s technologií pálení dřevěného uhlí v jamách a zjistili jsme základní vlastnosti a možnosti této technologie. Zapálený oheň na dně vyhloubené jámy funguje na principu komínového efektu, kdy vzduch není nasáván od spodu, ale vstupuje do jámy podél stěn a docíluje se tak velice dobrého

hoření, avšak s mnohem větší citlivostí na různé výkyvy, než je tomu v opačném pohybu vzduchu např. u milířů. Těmito výkyvy máme na mysli například povětrnostní změny, změny tlaku, volbu okolního terénu, špatně rozrovnanou vsázku, volbu špatného materiálu atd. Zvýšená citlivost této technologie je zapříčiněna dvěma hlavními fakty: za prvé jáma nasává vzduch od shora a nikoliv od spodu, jak je to u jiných technologií, a za druhé, velikostí prostoru, kterým je vzduch přiváděn a kterým je možno technologii ovlivnit. S těmito faktory je potřeba v průběhu pálení počítat a přizpůsobovat jim samotný výrobní postup.

Zhodnocení výrobních postupů

V této sérii experimentů jsme se zároveň snažili obsáhnout všechny možné výrobní postupy a zjistit jejich použitelnost a vlastnosti. **Zapálení dřevěné vsázky od spodu** se ukázalo daleko efektivnější než **zapalování vsázky od shora**. Zapálení od shora se uskutečnilo ve výpalech J7, J8 a J9, ale jejich průměrná výtěžnost dřevěného uhlí z množství vsazeného dřeva byla 10,3 % a množství nezuhleného dřeva mnohokrát převyšovalo vypálené uhlí. Specifická technologie proudění vzduchu v jámě v tomto případě nedovoluje rozšíření ohně při zapalování od shora, jelikož vzduch, který je potřebný na uskutečnění pyrolýzy ve spodních vrstvách je nejprve spotřebován vrstvami vyššími a v případě přebytku vzduchu se vsázka vznítí. Při zapalování vsázky tímto způsobem docházelo k předčasnému zuhlení dřevěné konstrukce roštu v důsledku vyvíjeného tepla při spalování vypáleného uhlí. Oproti tomu při zapalování od spodu postupovalo zuhlení od spodu nahoru, a když byla celá vsázka zuhlena, poklesla natolik, že nebylo možné dřevěnou konstrukci roštu tak jednoduše zuhlit. Při zapalování od spodu se nabízely dva možné postupy, před narovnáním vsázky a po narovnání vsázky. Experimenty se zapálením před narovnáním vsázky byly J1, J2, J3, J4, J5, J6 a když nepočítáme J6, který byl veden za jiným účelem, než hmotným produktem, vychází průměrná výtěžnost 43,1 % z celkové vsázky dřeva i se započítáním karbonizačního zbytku¹⁰. Výtěžnost při narovnání vsázky před zápalom z výpalu J10 činila 14,3 %, ale výtěžnost se může dále zvedat při zdokonalení technologie v dalších experimentech. Výhodou zapálení vsázky od spodu po narovnání vsázky je, že není nutné spálit žádný karbonizační zbytek, jak je tomu u zapálení před narovnáním vsázky a tudíž by měla být výtěžnost při úplném zuhlení vsázky mnohem vyšší. Další výhodou tohoto postupu je pohodlné a systematické rovnání vsázky s možností zapálení nepřímou po narovnání vsázky. Metoda s plněním jámy na rozdělaný oheň je ovšem efektivnější při výpalu, protože pracuje s vysušenými a předežhřátými stěnami zařízení.

Rozrovnání vsázky bez středového průduchu umožňovalo velkou variabilitu v metodě rozrovnání vsázky, především ve velikosti a formě vsázky, oproti postupu se středovým průduchem, kde bylo nutné dodržet kompaktní vsázku s jistými pravidly. Vsázka z dřevěných polen rozrovnávaná vodorovně překrytá křížem ve vrstvách způsobuje více prázdných prostorů, než při vyskládání vodorovně paprskovitě. Při paprskovitěm vyskládání polen se ale při rozrovnání střed dostává výše než kraje a pokud přímo nechceme polena dostat do svislé polohy, musíme je u stěn jámy prokládat po obvodu dalšími poleny. Polena vyskládaná do svislé polohy tento problém částečně vyřeší, ale vzniká zde jiný problém a to, že při zapalování od spodu se oheň i vzduch šíří nejsnazší cestou mezerami mezi poleny a tím dochází k neúplnému zuhlení vsázky, zejména u stěn, kam se oheň nedostane. Rozrovnání vsázky v jámě s větším průměrem (J7, J9) bylo mnohem snazší a bylo možné zachovat větší délku polen ve vsázce.

Svisle posuvný izolační rošt je oproti stabilnímu mnohem náročnější na údržbu, protože je nutné ho pravidelně sešlapávat, aby nedošlo k propadu v jeho plášti a vznícení vsázky. Tento postup byl použit při výpalu J3 a J5, ale jeho vliv na konečný produkt je zanedbatelný i přes přesnější možnost ovlivňovat průběh výpalu, protože vzduchové proudy jsou blíže samotné vsázce. Při použití obou typů roštu dojde vždy k částečnému znečištění obsahu jámy zeminou, která se uvolní z izolačního pláště. V tomto případě se u jam s menším průměrem otvoru jeví pohodlnější stabilní rošt, který se snáze obsluhuje. Možnost vypálení dřevěného uhlí bez využití izolačního krytu bude při dalších experimentech zkoumána.

Zhodnocení kvality dřevěného uhlí

Kvalita dřevěného uhlí byla jednoduše posuzována ihned po vypálení podle jistých indikátorů. Výpaly J1, J2, J3, J4, J5, J10, M1, M2 poskytovaly kvalitní dřevěné uhlí, které nezanechávalo stopu, některé kusy při poklepu lehce zvonily, v lomu byly sytě černé a tvořily kompaktní hmotu. Ostatní indikátory jako výhřevnost, čadivost teprve čekají na posouzení. Dřevěné uhlí z J7, J8 a J9 bylo z velké části opálené a nevyznačovalo se charakteristickými vlastnostmi jako ostatní produkty. Výpal J6 neposkytl žádné vzorky schopné posouzení.

Vybrané vzorky dřevěného uhlí ze všech výpalů (kromě J6) byly podrobeny laboratorním analýzám chemického složení vzorků. Z každého výpalu byl z různých částí vsázky odebrán jeden reprezentativní vzorek, který kvalitou charakterizoval celou produkci dřevěného uhlí¹¹, vzorek číslo 1 byl odebrán z částečně zuhleného polena z J1. Analýza byla zaměřena na detekci prvků jako C, H, N, S a vlhkost obsaženou ve vzorcích (Tabulka 6). Obsah fixního uhlíku ve vzorcích z uhelných jam průměrně činil 72,34 % a v milířích o srovnatelném objemu byl průměrný obsah 78,8 % C. Průměrné zastoupení H ve vzorcích z jam i z milířů činilo 3,1 %. Zastoupení N a S ve všech vzorcích bylo pod detekovatelnou hodnotou této metody. Průměrný obsah vlhkosti ve vzorcích z jam byl 6,7 % a z milířů 5,3 %¹². Z hlediska hodnocení kvality dřevěného uhlí je zde nejdůležitější obsah fixního uhlíku a obsah dalších stopových prvků. Aby mohl být produkt charakterizován jako dřevěné uhlí používané v průmyslu¹³, musí obsahovat minimálně 80 % fixního uhlíku, maximálně 2 % popelu, 12 % prchavých látek a 8% vlhkosti. Průměrný obsah fixního uhlíku z uhelných jam a milířů neodpovídá kvalitě dřevěného uhlí, ale samostatný produkt experimentů J3, J9 a M2 lze již považovat za dřevěné uhlí. Obsah vlhkosti a dalších prchavých látek ve vzorcích splňuje požadavky pro dřevěné uhlí a množství nespalitelného zbytku (popelu) nebylo v tomto případě analyzováno. Takto nízkou kvalitu dřevěného uhlí lze vysvětlit na základě vlivu konečné teploty karbonizace v závislosti na velikosti a charakteru vsázky. Názorně lze tento problém objasnit na J1–J5, které svým výrobním postupem dosahovaly téměř 100 % zuhlení vsázky a předpokládá se jejich reálné využití. Průměrná výtěžnost těchto 5 výpalů činila 43,1 % a průměrný obsah fixního uhlíku dosahoval 70 %. Tabulka 1. nám poskytuje možnost srovnání s univerzálními výsledky, kde získané hodnoty odpovídají teplotě karbonizace 300 °C a obsahu přibližně 30 % těkavých látek. Při M1 a M2 se nedosahovalo 100 % zuhlení vsázky, ale z historických zpráv a experimentálních výpalů milířů víme, že nezuhlené dřevo při plášti milíře, zejména u placu je pravidlem a nezáleží na velikosti. Průměrná výtěžnost M1 a M2 dosahovala 29,2 % a fixní uhlík byl průměrně zastoupen ve výši 78,8 %. Obsah fixního uhlíku bez možnosti potvrzení výtěžnosti kvůli technickým omezením zuhlení u malých milířů odpovídá podle tabulky 1. hodnotám okolo 400 °C.

Dovolím si shrnutí získaných poznatků z pohledu chemické kompozice a výrobního procesu. Ze získaných výsledků lze usuzovat, že kvalita produktu je závislá na teplotě výrobního procesu, ale teplota je zase závislá na množství vzduchu a ploše, kterou je vzduch přijímán, a době setrvání teploty na určitém místě. Při tomto vysvětlení jsou již patrné nedostatky technologie uhelných jam. Pokud uvažujeme, že jediná možnost zapálení vsázky v jamách omezených proporcemi větší hloubky než průměru, po zapálení vsázky v nížeji se pyrolytická vrstva šíří skrz vsázku vzhůru rychlostí závislou na množství přiváděného vzduchu. Tato pyrolytická vrstva pohlcuje většinu přiváděného vzduchu a nedovoluje úplnému dokončení procesu zuhlení v nižších vrstvách, nebo setrvání níže položené vsázky na této teplotě (viz J5). Tím vzniká dřevěné uhlí velmi rychle (viz J3), ve velkém množství, ale s velkým obsahem těkavých látek a nižším obsahem fixního uhlíku. Můžeme předpokládat, že nejkvalitnější dřevěné uhlí se bude nacházet v nejvyšších vrstvách vsázky, kde se pyrolytická teplota držela po nejdelší dobu. Oproti tomu mírně pracují s mnohem větším pláštěm, který dovoluje proniknutí vzduchu, ale u malých mířů nastává problém ten, že vsázka je zuhlena opět ve velmi krátké době a nedovoluje setrvání vypáleného uhlí na vyšších teplotách, které by vylepšily chemickou kompozici dřevěného uhlí. Další faktor, který může zásadně ovlivnit obsah fixního uhlíku v dřevěném uhlí, je zvolený druh dřeviny pro zuhlení. Tuto domněnku bude možné potvrdit až s použitím jiných druhů dřevin do vsázky. Vhodnost použití dřevěného uhlí s průměrným obsahem 72,3 % C pro metalurgické účely bude teprve zkoumána, zejména z pohledu výhřevnosti a rychlosti hoření. V souvislosti s vyhodnocením kvality dřevěného uhlí vypáleného v jamách musíme dát zapravdu Birringuciovu tvrzení, že dřevěné uhlí z jam je nižší kvality než uhlí mířové.

Dalším cílem tohoto experimentu bylo vysledovat výrobní postup, který by vedl ke stejným výsledkům, které nám poskytuje archeologická předloha. Za tímto účelem byl uskutečněn experiment J6, který měl sledovat průběh a důsledky záměrně neusměrňovaného výpalu. Výsledkem byla 2 cm silná vrstva popelu a drobných uhlíků rovnoměrně rozložená na dně jámy, kterou překrývala 9–11 cm silná vrstva dočervena vypálené sypké zeminy z izolační vrstvy roštu, bez kompaktních vypálených kusů (Obr. 13). Další vrstva silná 5 cm obsahovala pouze nevypálený jíl a kameny uvolněné při erozi stěn jámy v důsledku povětrnostních vlivů. Druhotné zásahy provedené v jámě pravděpodobně na jaře roku 2010 nebudou brány v potaz, protože nijak výrazně neovlivnily výsledek experimentu. Stěny jámy v původním profilu byly dohněda propáleny do hloubky 4 cm a ve spodních 50 cm propálení do červeného žáru dosahovalo až 8 cm. Při srovnání s archeologickou předlohou (Obr. 3) se získané výsledky značně liší. Výsledek experimentu ve spodní vrstvě obsahoval místo 30 cm vrstvy popelu promíšeného zbytky dřevěného uhlí pouze 2 cm vrstvu. Vrstva vypálené mazanice oproti archeologické předloze neobsahovala zbytky popelu a žádné kompaktní kusy vypálené mazanice s otisky dřevěné opěrné konstrukce roštu. Kompletní vypálení stěn do červeného žáru do hloubky několika cm bylo v experimentální jámě čitelné pouze ve spodních 50 cm, velice podobné obr. 5. Je evidentní, že zvolený postup nevedl ke shodným výsledkům s archeologickou předlohou. Můžeme předpokládat, že stav archeologického podkladu byl docílen záměrným neusměrňováním nebo zanedbáním výpalu, kdy došlo ke vznícení vypáleného uhlí, které bylo následně zasypáno vrstvou zeminy spolu s fragmenty roštu. Touto problematikou se budeme nadále experimentálně zabývat.

Zhodnocení časové náročnosti experimentů

V průběhu všech experimentů byly měřeny hodnoty časové náročnosti jednotlivých experimentů (Tabulka 7). Experimenty prováděly střídavě 4 osoby, z nichž jedna se vždy věnovala písemné a obrazové dokumentaci experimentů. Z toho důvodu je časová náročnost operací vztažena pouze na tři osoby. Průměrný čas věnovaný provozování technologie uhelných jam bez započítání času stráveného na hloubení a úpravě jam a J6 činí 21,9 h na jeden výpal. Průměrný čas strávený na výpal milířů M1 a M2 bez přípravy povrchu dosahuje 29,6 h na výpal¹⁴. Při tomto srovnání se jeví časová náročnost na provozování technologie uhelných jam mnohem nižší než u milířů.

Porovnání vlastností výrobních zařízení

Uhelná jáma typu Bubeneč se díky malé ploše otvoru jeví jako velmi citlivá na různé výkyvy v průběhu pálení, oproti jámě typu Kellerberg, která se s větší plochou otvoru ukázala jako stabilnější proti výkyvům, ale stále si zachovávala charakter a vlastnosti uhelných jam. V jámě s menším průměrem bylo mnohem náročnější vybírání a kontrolované plnění vsázky, nehledě na samotné hloubení jámy. Kvalita získaného produktu byla v zařízení typu Kellerberg i přes špatně zvolený výrobní postup vyšší. Uhelne jámy v průběhu pálení však nevyžadují tak pravidelnou kontrolu v průběhu výpalu jako milíře, které je nutné pravidelně stloukat, kvůli možným propadům izolační vrstvy. Technologické omezení jam při cíleném ovlivňování průběhu výpalu však přináší výhodu v případné kolizi v průběhu pálení, protože vznícená vsázka odhořívá pomalu a po vrstvách (úplné vyhoření obsahu jámy typu Bubeneč po vznícení trvá přibližně 24 h). Milíře menších objemů (M1, M2) jsou při výtěžnosti dřevěného uhlí omezeny danou technologií, zejména velkým povrchem pláště, který má vliv na neúplné zuhlení vsázky, s kterým se musí při pálení počítat. Při zapalování milíře metodou vyrovnání vsázky okolo hořícího ohniště se jeví optimální velikost vsázky do 0,5 m³, protože při vyšších objemech je již obtížně zvládnutelné udržení technologie bez úbytku části dřeva spálením při rozrovnávání.

Pozůstatky a specifikum uhelných jam

Uhelne jámy je možné od jiných pyrotechnologickým zařízení odlišit na základě jistých charakteristických znaků, jako je tvar jámy, obsah jámy a charakter propálení stěn. Pro dobu bronzovou a starší období nemáme zatím žádné spolehlivé nálezy uhelných jam. Uhelne jámy z doby železné a římské mají válcový tvar s kotlovitým dnem, průměr okolo 1 m a stejnou či větší hloubku (viz nálezy z Kellerbergu, Waschenbergu, Nienburgu a Prahy-Bubenče). Od doby římské se zároveň s rostoucí produkcí začaly používat čtvercové či obdélníkové jámy s několikanásobným objemem (viz nálezy z Tindimurru, Tramena, nebo historické zprávy z Afriky). Obsah jámy je závislý na technologickém postupu výpalu a způsobu ukončení technologie. Při úspěšném výpalu a vyjmutí produktu zůstane jáma prázdná, případně druhotně zanesena odpadem z blízkého pracoviště. Dojde-li během výpalu k nekontrolovanému vznícení vsázky, která se z určité části spálí, obsah jámy bude podobný výsledku experimentu J6. Jáma bude obsahovat část produktu ve formě kusů dřevěného uhlí, popela nebo dřevouhelného mouru a dále pozůstatky izolačního krytu z kamene (viz nálezy z Kellerbergu a Nienburgu) nebo vypálené hlíny (viz nálezy z Waschenbergu

a Prahy-Bubenče). Kámen může být tepelně postižen hořící vsázkou, stejně tak jako hlína, která se nachází vypálená dočervena v sypké formě, nebo ve tvaru kompaktních vypálených kusů s otisky dřevěné konstrukce na jedné straně a vyhlazené na straně druhé (viz nález z Prahy Bubenče). Charakter propálení stěn je závislý na počtu uskutečněných a neúspěšných (vznícených) výpalů a na výrobním postupu. Při postupu zapalování od shora nebo od spodu pomocí vsypání žhavých uhlíků na dno narovnané vsázky ani po opakovaném výpalu nevznikne žádné propálení stěn, které by se dalo archeologicky zachytit. Při zapalování odspoda pomocí rozdělaného ohně jsou dno jámy a stěny vystavovány teplotě, její působení je již možno v nálezu identifikovat. Po třech výpalech (viz J4) je povrch stěn poznamenán ohněm do hnědého vypálení do hloubky 1 cm a ve spodních 30 cm do červena a hloubky 5 cm. Po jednom neúspěšném (vzníceném) výpalu, který neusměrňovaně došel do konce (viz J6) se na stěnách zachovalo vypálení dohněda a to do hloubky 4 cm. Navíc kotlovitá nístěj ve spodních 50 cm nesla stopy propálené dočervena až do hloubky 10 cm. Samotné dno bylo poznamenáno žárem dohněda do hloubky až 3 cm (viz Obr. 13). Z těchto výsledků vyplývá, že uhelnou jámu je možné archeologicky zachytit pouze v případě, že jáma pracovala opakovaně s technologií zapalování odspoda pomocí rozdělaného ohně, nebo v případě, že došlo ke vznícení vsázky, která poznamenala žárem stěny jámy.

Závěr

Výsledky experimentu potvrdily možnost pálení dřevěného uhlí v jámě typu Bubeneč a prezentují množství výrobních postupů, kterými je možné produktu docílit. Experimentálně byly vyzkoušeny všechny nejdůležitější výrobní postupy a zjištěny jejich přednosti a nedostatky. Získané poznatky by měly vytvořit základ pro pozdější detailní zkoumání této technologie. Nepodařilo se nám ale experimentem dosáhnout výsledku, který by se shodoval s archeologickou předlohou. Dřevěné uhlí vypálené v jamách dosahuje vysoké objemové výtěžnosti (až 54 %), ale naopak nízké kvality, hodnocené podle obsahu fixního uhlíku (průměrně 70 %).

Praktikování této technologie v malých objemech pro okamžité potřeby pravěkých hutí se ve výsledku jeví méně fyzicky i materiálně náročné na obsluhování a provozování, než je tomu u milířů. Můžeme předpokládat, že pálení probíhalo kontinuálně ve dvou či více jamách a že uhlíři byli schopni do 48 hodin z jedné jámy produkovat až 0,4 prm dřevěného uhlí. Tuto „šetrnou“ technologii si můžeme i dost dobře představit v blízkosti samotných sídlišť či hutí zajišťující stálý přísun menšího množství suroviny. Podíváme-li se na pravěké či středověké sídlištní areály, určitě na některém z nich nalezneme odpadní jámu nebo obilné silo, které nese charakteristické prvky uhelných jam. Třeba si stačí dát do souvislostí jiné možné praktické využití těchto objektů, než je udáváno.

Poděkování

Touto cestou bychom velice rádi poděkovali všem osobám, které se určitou mírou podílely na uskutečnění tohoto experimentu. Celý experiment byl realizován členy Spolku archaických nadšenců ze Sebranic u Litomyšle, kteří si zaslouží největší vděk. Dále děkujeme B. Dragounovi za poskytnutí zázemí a suroviny při terénních experimentech, dále J. Woitschovi za financování provedených chemických analýz dřevěného uhlí a pomoc při hledání historických podkladů a J. Kaderovi za množství praktických

informací k problematice pálení dřevěného uhlí. Velký dík patří také všem, kteří se na experimentu podíleli a nejsou zde zmíněni.

Poznámky

- 1) Tato problematika je v odborné literatuře velice dobře zpracovaná, zejména B. Dragounem a V. Matouškem (Dragoun, Matoušek 2004) a J. Woitschem (Woitsch 2009).
- 2) V nálezech z Tramena a Tindimurru je vidět určitá podobnost s mělkými obdélníkovými jámami z Afriky (viz historické zprávy) a můžeme předpokládat, že i technologie výpalu mohla probíhat velice podobně
- 3) Nálezové zprávy jsou uloženy v archivu AÚ Praha, č. 6142/49 a 263/50, článek shrnující oba nálezy publikoval B. Novotný, Laténská pec z Prahy-Bubenče, AR IV 1952, 275–278.
- 4) Pálení milířů je stále běžnou praxí například v rumunské Transylvánii, jak popisuje J. Woitsch (Woitsch 2009, str. 46–50).
- 5) KADERA, J.: Výpal milíře, Český les – příroda a historie 4, 2008, str. 24–27 a zároveň článek v tomto sborníku.
- 6) V Ruské národopisné literatuře jsou zmínky o zapalování nezakrytých jam, postupně naplňovaných dřevem na již hořící vrstvu, (zkráceně Pleiner 2000, str. 119) a stejný postup se praktikoval i v západní Africe (FAO 1987) a v 19. století na území Čech (Doležal 1872, 238–239).
- 7) Tento postup zapalování nebyl v žádné dostupné literatuře uváděn a do experimentů byl zahrnut pouze s cílem obsáhnouti všech možných výrobních postupů a zjištění jejich vlastností.
- 8) Pro označení jednotlivých experimentů s jámami byly zvoleny zkratky J1 – J10 a pro milíře M1 a M2
- 9) Tento jev je zapříčiněn nejspíše tím, že na východní části byl po delší dobu nasáván vzduch do jámy a to urychlilo zuhlení dřeva v tomto místě a tudíž i vzplanutí vypáleného uhlí.
- 10) Výtěžností je myšleno objemové množství získaného dřevěného uhlí z celkového objemu dřeva. Množství surovin je uváděno v jednotkách prm a bylo zjištěno změřením objemu suroviny a dopočítáním podle objemových vztahů.
- 11) Analýzy provedly Centrální laboratoře na VŠCHT v Praze na přístroji Elementarvario EL III firmy Elementar. Přesnost metody je výrobcem stanovena pro souběžnou analýzu 5 mg standardu 4-amino-benzen sulfonovou kyselinu v modulu CHNS na < 0,1 % pro každý prvek. Z každého vzorku byla analyzovaná navážka 1–3 mg rozdrčeného dřevěného uhlí. Vzorky byly silně nehomogenizované, proto k sobě jednotlivé tolerance nesedí a byly proto v některých případech analyzovány až tři navážky z jednoho odebraného vzorku. Podotýkám, že nemůžeme vyvozovat žádné rozhodující závěry z výsledků těchto analýz, protože výsledky jsou ovlivněny kvalitou analyzovaného vzorku, který v jedné produkci dosahuje silně různorodých výsledků.
- 12) Naměřené hodnoty vlhkosti odpovídají množství obsažené vlhkosti ve vzorcích v době provádění měření (listopad 2010) a nikoliv po samotném vypálení dřevěného uhlí.
- 13) Např. normy Din 517 49, ČSN EN 12903 (75 5703)
- 14) Tyto hodnoty neodpovídají skutečnému času strávenému na provozování technologie a jsou ve skutečnosti nižší, protože obsluha technologie v průběhu pyrolýzy vyžaduje pouze občasnou kontrolu a údržbu.

Výběr použité literatury

- CYRUS, M.–MATOUŠEK, V.: Lhota 2007, Experimentální pálení milíře tradiční technologií, *Archeologia technica* 20, TMB 2009, s. 54–60
- DOLEŽAL, J.: HÁJ – Časopis pro lesníka, myslivce a přítele přírody, str. 238–239, Praha, 1872
- DRAGOUN, B.–MATOUŠEK, V.: Archeologický odkryv uhlíště v Olbramově a experimentální pálení dřevěného uhlí v Uhřínově, *Archeologie ve středních Čechách* 8, 2004, str. 727–772
- FAO, Food and agriculture organization of the United Nations: Simple technologies for charcoal making, Rome, 1987
- KELLEY, F.V.: Charcoal and charcoal burning, 2002, s. 5–6
- KMOŠEK, J.: Rekonstrukce pravěkého hutnictví železa, Středoškolská odborná činnost, Sebranice 2008
- NOVOTNÝ, B.: Laténská pec z Prahy-Bubenče, *AR IV*, 1952, 275–278.
- PERCY, J.: Die Metallurgie, Gewinnung und verarbeitung, Braunschweig, 1863, s. 140
- PLEINER, R.: Základy slovanského železářského hutnictví v českých zemích, Praha 1958, s. 64–68
- PLEINER, R.: Iron in archeology, Praha 2000, s. 116–123
- SMITH, C.S. – GNUDI, M. T.: The Pirotechnica of Vannoccio Biringuccio, New York, Translated 1990, s. 173–178
- PROTA, F.: Dřevěné uhlí v železářství, *Svět techniky* 11, 1960, s. 301–305
- WOITSCH, J.: Vlastnosti a kvalita dřevěného uhlí vyrobeného při experimentu ve Lhotě na Křivoklátsku, *Archeologia technica* 20, TMB 2009, s. 46–53

Příloha č. 1.,

Experiment	Datum	Doba předehřevu (min)	Doba rovnání vsázky (min)	Doba výpalu (min)	Doba chlazení (min)	Objem zařízení (m ³)	Spotřebadřeva na předehřev (prm)*	Celková spotřeba dřeva (prm)	Celkové množství vypáleného uhlí (prm)	Mour a hlína (prm)	Nezuhlená polena (prm)	Výtěžnost dřevěného uhlí z celkového množství dřeva (%)
J1	18.-20.8.2009	90	25	655	1860	0,7	0,2	0,84	0,125	0,02	0,306	14,88
J2	20.-21.8.2009	55	85	520	1155	0,7	0,12	0,76	0,388	0,024	0,032	51,05
J3	20.-22.8.2009	90	105	810	1440	0,7	0,14	0,78	0,342	0,059	0,012	53,84
J4	22.-24.8.2009	50	240	740	1740	0,7	0,12	0,76	0,411	0,027	0,017	54,07
J5	22.-24.8.2009	85	150	760	1960	0,7	0,18	0,82	0,343	0,019	0,074	41,82
J6	24.-26.8.2009	35	170	500	1200	0,7	0,09	0,73	0	0,045	0	0
J7	13.8.-15.8.2010	0	115	480	1320	0,902	0	0,84	0,05	0,04	0,72	5,95
J8	13.8.-16.8.2010	0	96	825	1860	0,7	0	0,7	0,067	0,025	0,47	9,57
J9	16.8.-18.8.2010	0	70	805	1885	0,902	0	0,85	0,131	0,03	0,51	15,41
J10	17.8.-18.8.2010	0	65	595	970	0,7	0	0,7	0,1	0,03	0,38	14,28
M1	14.8.-17.8.2010	0	35	1350	1740	0,75	0,012	0,762	0,22	0,148	0,21	28,87
M2	17.8.-18.8.2010	0	15	840	525	0,5	0,01	0,51	0,151	0,135	0,095	29,6

Vysvětlivky: prm – prostorový metr (krychle o hraně 1 × 1 × 1 m), toto označení bylo zvoleno pro přesnější zaznamenání objemových vztahů měřených materiálů

Tabulka 5: Parametry jednotlivých experimentů

experiment	vzorek	navážka (mg)	% C	% průměrný obsah C	% H	% vlhkost
J1	Vz 1	3,0700	50,52	50,46	6,236	6,02
	Vz 1	3,1430	50,40		6,360	
	Vz 2	1,4610	72,30	70,56	2,768	6,84
	Vz 2	2,6510	66,80		3,612	
	Vz 2	2,7120	72,51		3,895	
J2	Vz 3	2,4860	71,42	71,37	2,259	7,42
	Vz 3	2,7790	71,36		2,381	
J3	Vz 4	2,5480	81,29	81,16	3,114	6,41
	Vz 4	3,1180	81,03		3,450	
J4	Vz 5	1,6460	77,76	76,1	2,252	7,04
	Vz 5	2,4070	74,36		2,111	
	Vz 5	3,1170	76,19		2,674	
J5	Vz 6	1,8710	70,47	70,53	2,748	6,08
	Vz 6	2,0820	70,58		2,860	
J7	Vz 7	2,1440	79,17	79,040	2,437	6,260
	Vz 7	2,7080	78,92		2,833	
J8	Vz 8	2,7630	71,49	71,580	4,346	7,140
	Vz 8	3,4060	71,68		4,699	
J9	Vz 10	2,1270	80,44	82,580	2,105	7,010
	Vz 10	2,3620	82,47		1,907	
	Vz 10	2,3100	84,84		1,945	
J10	Vz 11	2,4660	69,82	69,990	2,299	5,390
	Vz 11	2,4910	70,16		2,231	
M1	Vz 9	1,6840	76,02	75,240	3,098	6,440
	Vz 9	2,1260	75,24		3,443	
	Vz 9	2,7150	74,48		3,826	
M2	Vz 12	2,1200	82,24	82,350	2,491	4,140
	Vz 12	2,5820	82,46		2,764	

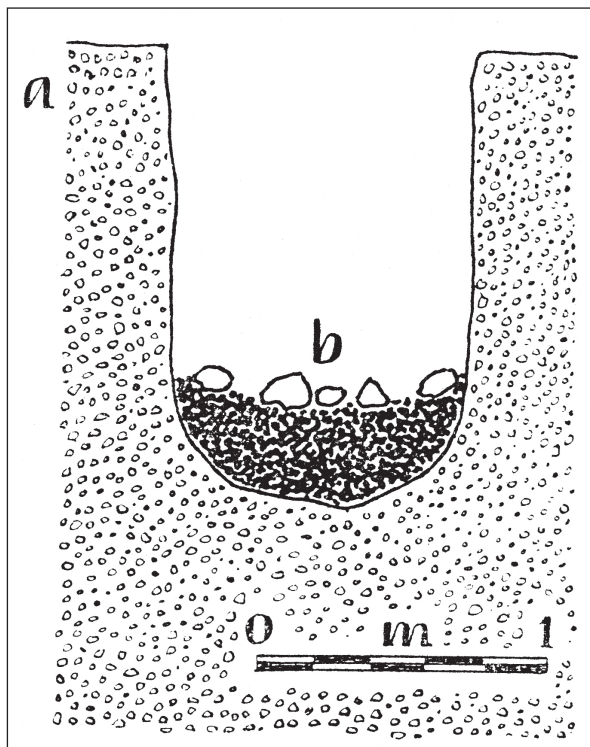
Tabulka 6: Laboratorní analýzy chemického složení vzorků dřevěného uhlí

ZKOUMÁNÍ VÝROBNÍCH OBJEKTŮ A TECHNOLOGIÍ ARCHEOLOGICKÝMI METODAMI

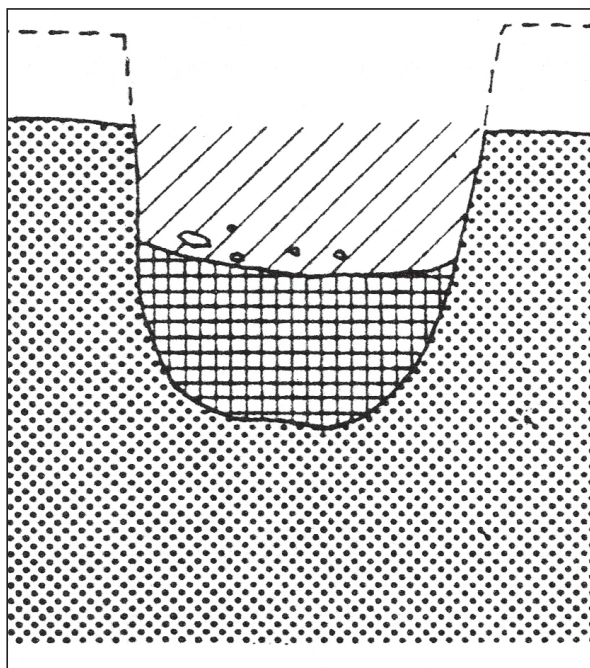
experiment	experimentátor 1	experimentátor 2	experimentátor 3	celkem
J1	hloubení jámy 7h	hloubení jámy 5h	vyprazdňování jámy 1,5h	32h
	vysoušení a předešívání jámy 1,5h	štípání dřeva 4h	třídění a balení uhlí 0,5h	
	rovnání vsázky 0,5h	transport dřeva 0,5 h		
	příprava a výroba roštu 1,5h	výroba roštu 0,5h		
	kontrola výpalu (občasně) 11h	vyprazdňování jámy 0,5h		
J2	vysoušení a předešívání jámy 1h	štípání dřeva 2h	vyprazdňování jámy 1h	16,5h
	rovnání vsázky 1,5h	transport dřeva 0,5 h	třídění a balení uhlí 0,5h	
	příprava a výroba roštu 1h	vyprazdňování jámy 0,5h		
	kontrola výpalu (občasně) 8,5h			
J3	rovnání vsázky 2h	štípání dřeva 2h	hloubení jámy 16h	38,5h
	příprava a výroba roštu 1h	vysoušení a předešívání jámy 1,5h	vyprazdňování jámy 1h	
	kontrola výpalu (občasně) 13,5h	transport dřeva 0,5 h	třídění a balení uhlí 0,5h	
	vyprazdňování jámy 0,5h			
J4	rovnání vsázky 4h	štípání dřeva 3h		22,5h
	vysoušení a předešívání jámy 1h	příprava a výroba roštu 1h		
	kontrola výpalu (občasně) 12,5h	transport dřeva 0,5 h		
	vyprazdňování jámy 1h	třídění a balení uhlí 0,5h		
J5	rovnání vsázky 2,5h	štípání dřeva 4h	vyprazdňování jámy 1h	23,75h
	příprava a výroba roštu 1h	vysoušení a předešívání jámy 1,25h	třídění a balení uhlí 0,5h	
	kontrola výpalu (občasně) 12,5h	transport dřeva 0,5 h		
	vyprazdňování jámy 0,5h			
J6	rovnání vsázky 3h	štípání dřeva 4h		9h
	příprava a výroba roštu 1h	vysoušení a předešívání jámy 0,5h		
	kontrola výpalu (občasně) 0h	transport dřeva 0,5 h		
J7	rozšíření jámy 3h	štípání dřeva 5h	plnění jámy 1,5h	24h
	vysoušení (občasně) 5h	plnění jámy 2h	vybírání jámy 1h	
	vybírání uhlíků z jámy 0,5h	vybírání jámy 1h	třídění a balení uhlí 0,5h	
	příprava a výroba roštu 1h	kontrola výpalu (občasně) 8h		
J8	vybírání vody a zeminy z jámy 1,5h	štípání dřeva 5h	plnění jámy 1,5h	33h
	vysoušení (občasně) 6h	plnění jámy 1h	vybírání jámy 1h	
	vybírání uhlíků z jámy 0,5h	vybírání jámy 1h	třídění a balení uhlí 0,5h	
	příprava a výroba roštu 1h	kontrola výpalu (občasně) 14h		
J9	plnění jámy dřevem 1,5h	příprava vedlejších surovin 2h	výroba roštu 0,5h	22,25
	vybírání jámy 1h	štípání dřeva 2h	vybírání jámy 1h	
	přebírání uhlí 0,75h	kontrola výpalu (občasně) 13,5h		
J10	plnění jámy dřevem 1,5h	příprava vedlejších surovin 1,5h	štípání dřeva 1,5h	17h
	vybírání jámy 0,75h	kontrola výpalu (občasně) 10h	výroba roštu 0,5h	
	přebírání uhlí 0,5h		vybírání jámy 0,75h	
M1	příprava placu 1,5h	příprava placu 1,5h	udržování ohně pro zápal 0,75h	41
	transport surovin 3,5h	rovnání dřeva 0,5h	příprava placu 1,5h	
	štípání dřeva 4h	výroba pláště 1h	výroba pláště 1h	
	rovnání dřeva 0,5h	rozebírání milíře 0,75h	rozebírání milíře 0,75h	
	rozebírání milíře 0,75h	kontrola výpalu (občasně) 22,5h	třídění a balení uhlí 0,5h	
M2	příprava placu 0,5h	rovnání milíře 0,5h	třídění uhlí 0,75h	23,25h
	štípání dřeva 3h	výroba pláště 0,5h	rozebírání milíře 0,5h	
	rovnání milíře 0,5h	rozebírání milíře 1h	udržování ohně pro zápal 0,5h	
	výroba pláště 0,5h	kontrola výpalu (občasně) 14h	transport surovin 1h	

Tabulka 7: Časová náročnost jednotlivých experimentů

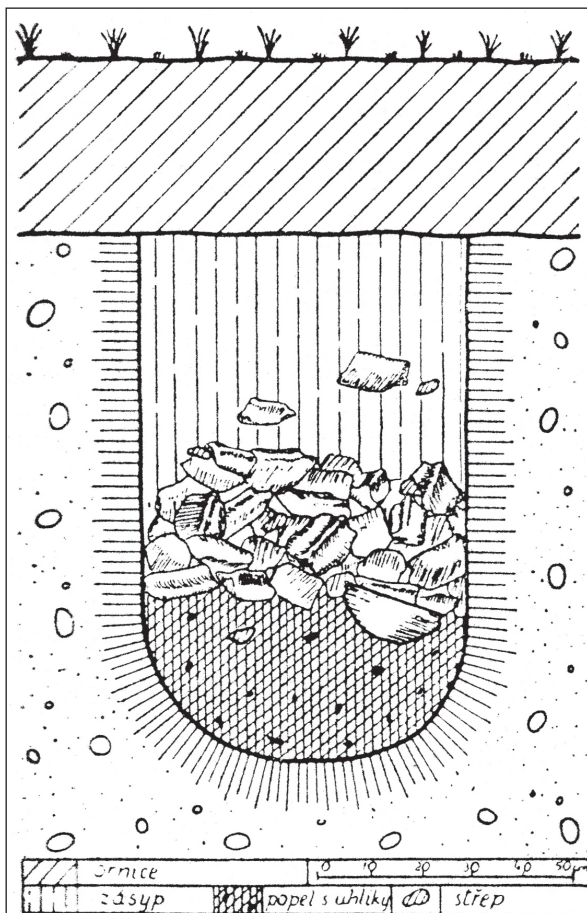
Příloha č. 2



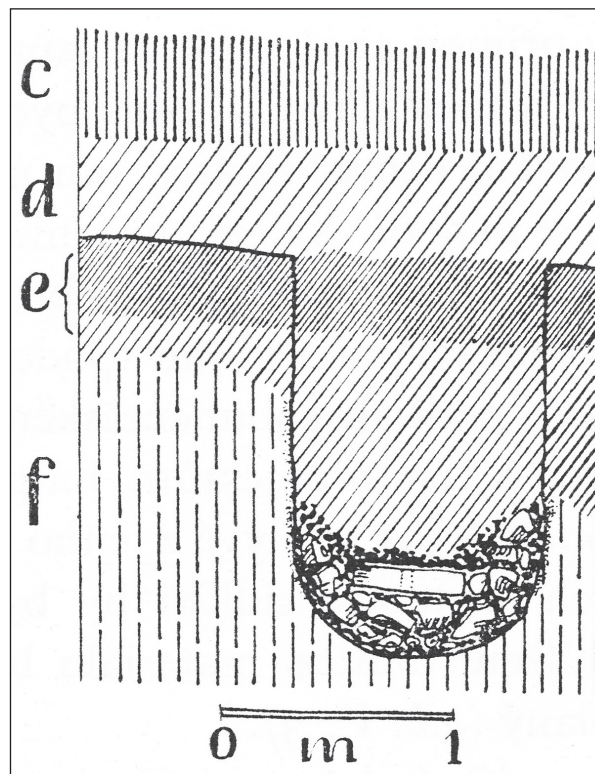
Obr. 1: Řez galo-římskou uhelnou jámou z Kellerbergu, uvnitř patrný popelovitý zásyp a množství kamenů (podle Pleiner 1958)



Obr. 2: Řez pozdně halštatskou uhelnou jámou o průměru 100 cm z Waschenbergu (podle Pleiner 2000)



Obr. 3: Řez uhelnou jámou č. 1. o průměru 120 cm z Prahy Bubenče, objevenou v roce 1949 (podle Pleiner 1958)



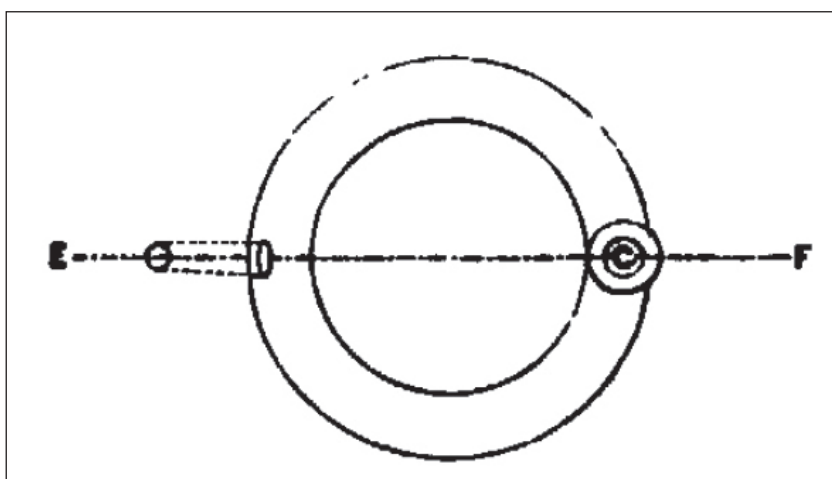
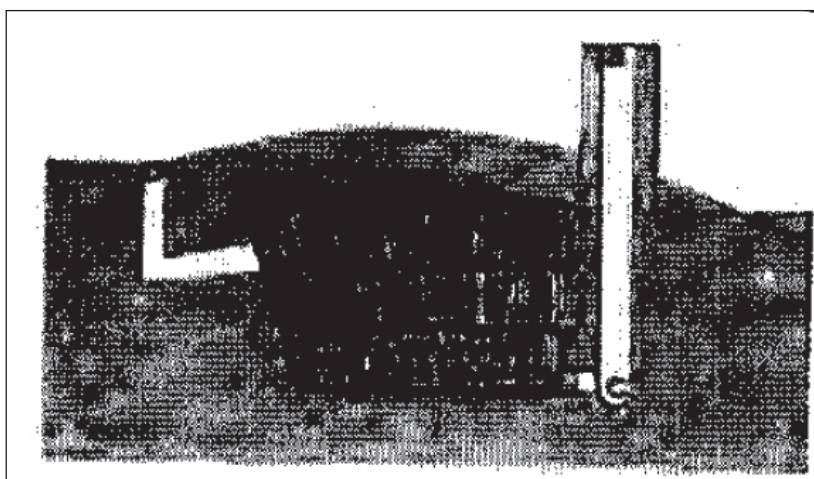
Obr. 4: Řez uhelnou jámou č. 2. z Prahy Bubenče, objevenou v roce 1950 (podle Pleiner 1958)



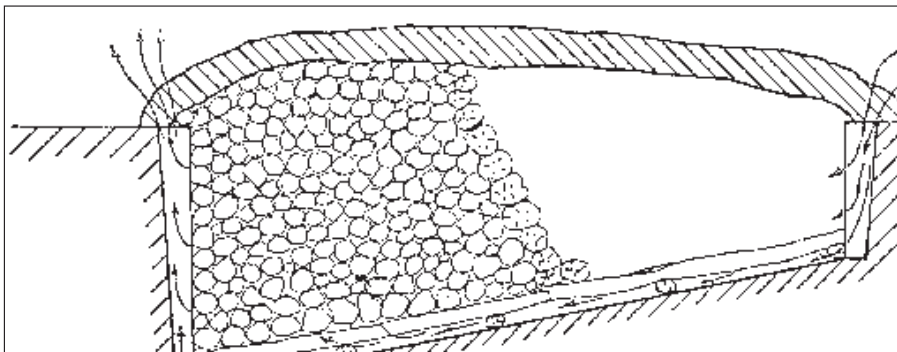
Obr. 5: Detail vypáleného kotlovitého dna jámy č. 1 z Prahy-Bubenče (foto náleзовá zpráva č. 6142/49)



Obr. 6: Ilustrace z Pirotechniky ot Vannoccia Biringuccia dokumentující průběh pálení (vlevo) a plnění jámy kořeny z kručinky (vpravo), (podle Pleiner 1958)



Obr. 7: Pálení uhlí v jamách v Číně, nalevo řez jámou a napravo schematický půdorys (podle Percy 1863)



Obr. 8: Schematický řez obdélníkovou jámou, naplněnou vsázkou dřeva o celkovém objemu 30 m³. Ghana, východní Afrika (podle FAO 1987)



Obr. 9: Uhelné jámy při fázi nakládání. Povšimněte si velkých rozměrů polen, která lze úspěšně při výpalu použít. Ghana, východní Afrika (foto FAO 1987)



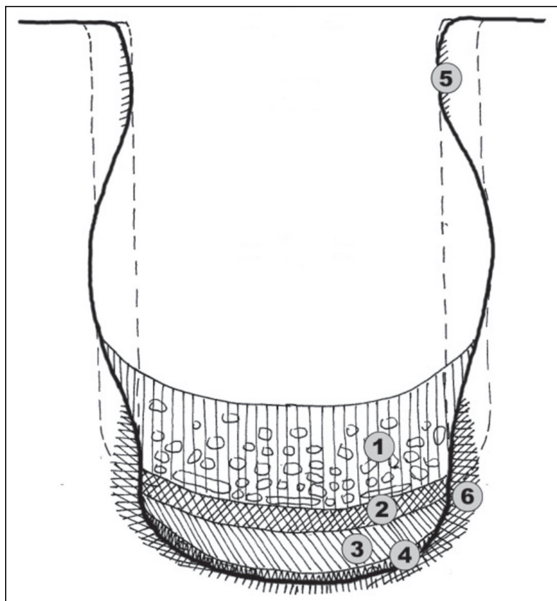
Obr. 10: Průběh suché destilace dřeva v jamách. Vznikající zplodiny jsou odváděny pomocí plechových komínů. Ghana, východní Afrika (foto FAO 1987)



Obr. 11: Vsázka dřeva částečně převyšující mělkou jámu, povšimněte si skladebnosti dřeva a celkového zužujícího tvaru hromady. Severní Afrika (foto Kelley 2002)



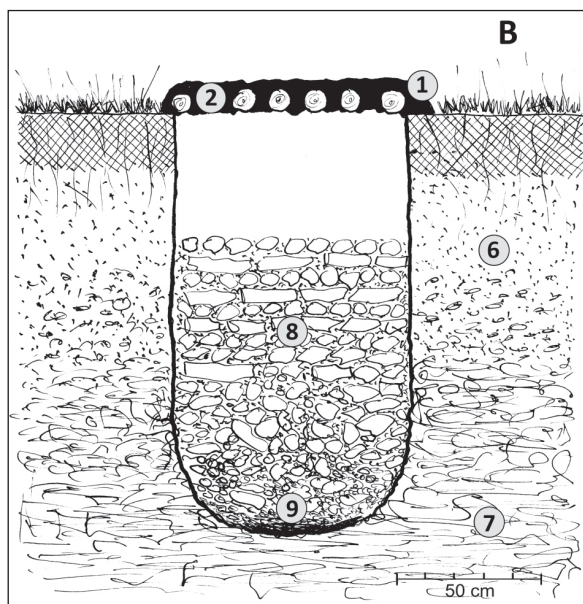
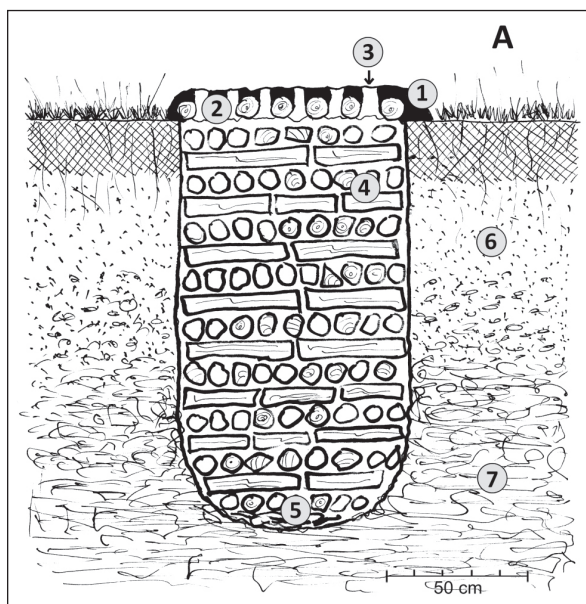
Obr. 12: Obdélníkové mělké uhelné jámy na deltě Nilu, dřevo je pokryté slámou a připraveno na pokrývání zeminou. Vlevo vzadu jsou patrné pozůstatky po dokončeném výpalu. Okolí delty Nilu (foto Kelley 2002)



Obr. 13: Řez jámou č. 1., stav k létu 2010
(kresba Jiří Kmošek)

Popis k obrázku:

1. vrstva vypálené mazanice promíšená s dřevěným uhlím, na spodu zbytky nedopáleného dřeva,
2. jílovitá vrstva s kameny,
3. vrstva vypálené mazanice z původního roštu,
4. popelovitá vrstva s uhlíky,
5. vypálení stěn do hněda, 6. vypálení stěn nístěje do červeného žáru



Obr. 14: Kresebná rekonstrukce řezu jámy v průběhu experimentu J4 (kresba Vojtěch Kmošek)

- A – Stav po zaplnění jámy dřevem a položení izolačního roštu
B – Stav po výpalu

Popis k obrázkům 14 A, B:

1. hlíněná vrstva izolačního roštu, 2. dřevěné kulatiny nesoucí rošt, 3. vzduchové průduchy, 4. rozrovnaná polena ve vrstvách, 5. žhnoucí vrstva na dně jámy, 6. jílovitá vrstva podloží, 7. štěrkoslínové podloží,
8. vypálené dřevěné uhlí, 9. drobné kousky uhlí a dřevouhelny moud



Obr. 15: Přehřívání jámy č. 1 kletím a drobným dřevem (experiment J1)



Obr. 16: Rozrovnávání vsázky v jámě pomocí dlouhého bidla (J1, foto Jakub Kmošek)



Obr. 17: Silný dým prodlužující dobu plnění jam, zapříčiněný špatnými klimatickými podmínkami (J4 a J5, foto Jakub Kmošek),



Obr. 18: Stav výpalu po odkrytí izolačního roštu (J4, foto Jakub Kmošek),



Obr. 19: Vybírání obsahu jámy vleže (J2, foto Jakub Kmošek)



Obr. 20: Nedokonale zuhlená vsázka paprskovitě rozrovnaných polen (J7, foto Jakub Kmošek)



Obr. 21: Plnění jámy dřevem, v popředí polena určená do vsázky, která zároveň sloužila jako povětrnostní zábrana (J8, foto Jakub Kmošek)



Obr. 22: Pokrývání pláště milíře smrkovým chvojem zabraňujícím propadávání zeminy (M1, foto Jakub Kmošek)



Obr. 23: Vyrovnávání dlouhých polen a kulatin okolo ohně (M2, foto Jakub Kmošek)



Obr. 24: M1 po odkrytí hliněného pláště, u vnějšího pláště vsázky jsou patrná nezuhlená polena (foto Jakub Kmošek)