



Středoškolská technika 2009

Setkání a prezentace prací  
středoškolských studentů na ČVUT

## **REKONSTRUKCE PRAVĚKÉHO HUTNICTVÍ ŽELEZA**

**Jiří Kmošek**

SUPŠ a VOŠ Turnov,  
Skálova 373, 511 01



Prohlašuji tímto, že jsem soutěžní práci vypracoval zcela samostatně a uvedl v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další informační zdroje včetně internetu.

V Sebranicích dne 15.5.2009

.....

**Annotation**

Kmošek, J. Reconstruction of prehistoric ferrous metallurgy. Sebranice, 2008.

My work deals with reconstruction of working procedures of iron in prehistoric times. It describes a brief technological and historical development of metallurgy in Europe. My own metallurgical experiments of reconstructed prehistoric iron furnaces are given in more detail.

**Anotace**

Kmošek, J. Rekonstrukce pravěkého hutnictví železa .Sebranice, 2008.

Práce se zabývá rekonstrukcí výrobních postupů železa v pravěku. Popisuje stručný technologický a historický vývoj hutnictví v Evropě. Detailně zde jsou popsány vlastní metalurgické experimenty v rekonstruovaných pravěkých železářských zařízeních.

## Obsah

<b>I. HISTORICKÝ VÝVOJ ŽELEZÁŘSTVÍ .....</b>	<b>6</b>
Vznik železářství .....	6
Počátky železářství v českých zemích v době halštatské .....	7
Laténské železářské hutnictví.....	7
Vývoj hutnictví od změny letopočtu po současnost .....	8
<b>II. SUROVINY UŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ ŽELEZA .....</b>	<b>10</b>
Železné rudy .....	10
Palivo starých železářů.....	13
Problematika umělého přívodu vzduchu do pecí .....	17
<b>III. VÝROBA ŽELEZA PŘÍMOU A NEPŘÍMOU METODOU .....</b>	<b>19</b>
<b>IV. POKUS O REKONSTRUKCI VÝROBY ŽELEZA V NĚKTERÝCH TYPECH PRAVĚKÝCH PECÍ.....</b>	<b>21</b>
Pokusné tavby v miskovitých zahloubených pecích .....	21
Pokusné tavby v šachtových pecích typu Podbořany .....	24
Rekonstrukce hutnictví železa v pravěku .....	30
Seznam použité literatury .....	36
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>37</b>

## HISTORICKÝ VÝVOJ ŽELEZÁŘSTVÍ

V této kapitole bych rád stručně nastínil historický vývoj železářství, zaměřený především na vznikající a rozvíjející se hutnické řemeslo, s přihlédnutím ke kulturně civilizačním změnám před letopočtem na našem území.

### Vznik železářství

Prvotní železo se vyrábělo za poměrně nízkých teplot přímo rudy a ne zkujňováním tekutého železa, jak je tomu dnes.

Výrobě železa ale předcházela zaběhnutá výroba a zpracování mědi a jejích slitin, která má v Evropě kořeny již na sklonu *eneolitu*, ale předtím však již v 7. až 5. tis. př.n.l. některé kmeny na Předním východě tuto technologii ovládaly. V průběhu doby bronzové se začala projevovat vyčerpanost dosud známých ložisek, což byla jedna z příčin, proč se lidé začali ohlížet po jiném kovu, který by uspokojil stále se zvětšující poptávku. Na základě velice ojedinělých nálezů lze předpokládat, že první setkání člověka s kovovým železem, nastalo již dávno před rokem 3000 př.n.l., na území ve východním Středomoří. Zpočátku se jednalo hlavně o železo meteoritické (charakteristické vysokým obsahem niklu), či železo náhodně vyrobené. V třetím a druhém tis. př.n.l. začaly pracovat první železářské pece v přední Asii a Anatólii, kdy se jednalo především o zbraně a předměty mimořádného významu. Vznik železářství je úzce spojen se zaběhnutou technologií výroby mědi, kdy tavbou sulfidických rud ( $\text{CuFeS}_2$ ) vzniká železo jako vedlejší, odpadový produkt. K oddělení obou technologií došlo ke konci 2. tis. př.n.l., kdy se v objevují v 12.-11.st. př.n.l. železné zbraně i výjimečně zemědělské nářadí, ale stále se jedná o okolí východního Středomoří.

Otázka, kde vznikla metalurgie železa, je stále nezodpovězená, zdali se objev uskutečnil na jednom místě kulturního dějiště, či zda se jedná o jev, polygenetický. Do Evropy se znalost výroby železa dostávala přes Středomoří, Makedonii, dnešní severní Jugoslávii a do východních podhůří Alp, odkud se pak volně šířila do ostatních částí střední a severní Evropy. Do střední Evropy se znalost zpracování železa dostala až v halštatském období, okolo 8.st. př. n. l.

## Počátky železářství v českých zemích v době halštatské

Do českých zemí se znalost metalurgie železa šířila z podhůří Alp, kde byly výhodné podmínky pro pokusy s výrobou nového kovu, především veliké rudné zásoby norických hnědelů. Nejprve se museli evropští hutníci přizpůsobit změně výrobní technologie, především správnému zpracování železné rudy a zpracování polotovaru v pevném stavu do *houbovitého útvaru*. Ovládnutí technologie znamenalo vítězství kovu a jeho pozvolné rozšiřování. Největšími odběrateli byly zámožné a vlivné vrstvy, kde se jednalo především o ozdobné předměty či zbraně. Do řemeslných a zemědělských nářadí kov pronikal velice sporadicky. Tavby mohly probíhat jednak v nízkých nadzemních šachtových pískách nebo v prostých výhňových objektech. Ke kovodělným řemeslům, jako je šperkařství a slévačství přibylo nově i kovářství železa, které s sebou přineslo i nové technologie zpracování kovů. Především je to *cementování* a kovářské *svařování* v ohni. Cementování se uplatňovalo u předmětů vysoce mechanicky namáhaných, jelikož železo, vyráběné přímou cestou primitivním způsobem v jámových výhňích, nemělo možnost získat větší množství uhlíku. Dělo se tak až sekundárně, opakovaným vyhříváním v dřevěném uhlí při teplotě 800 – 900°C, kdy byl kov opatřován vrstvičkou s vyšším obsahem uhlíku schopnou *kalení*.

## Laténské železářské hutnictví

Keltská expanze ve 4.st. př. n. l., která v mnoha oblastech přinesla zvýšení počtu obyvatel a jisté výrobní vzepjetí, předpokládala alespoň minimální materiální zabezpečení. To byl krok k masovému rozšíření železných předmětů do téměř všech řemeslných i bojových činností. Rozkvět keltského řemesla, zejména v poslední fázi dějin Keltů v středoevropském prostoru, lze vysvětlit, výrazným přiblížením expandujících Keltů na pouti Evropou, zejména s řeckými koloniemi.

I keltské slévačství bronzu přetrvalo a dosáhlo vrcholné dokonalosti, hlavně ve výrobě šperků a uměleckých předmětů. *Nejdůležitějším řemeslem se stalo však kovářství, jehož výrobky se staly nedílnou součástí života Keltů*. Výrobu železa prováděli hutníci ve dvou typech šachtových pecí doložených archeologickými nálezy (Pleiner). U nás typ východokeltské se zahloubenou nýstějí (viz. obr. 12., nebo v kapitole 4.) Železo vyráběli redukcí oxidických rud, získávaných především formou povrchové těžby. Laténské železné výrobky se rozšířily téměř do všech oborů lidské činnosti, od předmětů zemědělských (kosy, srpy, radlice, rýče...), či řemeslné povahy (sekery, kladiva, pilky, pilníky, dláta...), až po

zbraně Keltů. Učenlivost a zkušenost keltských řemeslníků, především tavičů a kovářů, dosáhly již takové úrovně, že značně ovlivnily veškerou železářskou výrobu v dobách pozdějších.

## **Vývoj hutnictví od změny letopočtu po současnosti**

### **Římské železářství**

Po změně letopočtu se začaly vytrácet ucelené keltské kmeny a rozsáhlé sídlištní aglomerace a došlo k určitému splynutí keltského lidu ke skupinám o stejném civilizačním stupni vývoje (germánské a římské kmeny). Lidé v českých zemích se soustředili k vesnickému osídlování a shlukování v menších osadách, kdy ke každé náležela alespoň jedna malovýrobní hutnická a kovářská dílna. Zkušenosti v kovářství a hutnictví do jisté míry přetrvávají podle silně zažitého vzoru keltských řemeslníků. Redukce byly prováděny v několika typech zařízení. Jednak v polozahloubených pískách, podobných keltským, dále v jámových zahloubených pecích anebo ve volně stojících šachtových pecích, které jsou známy z archeologických nálezů.

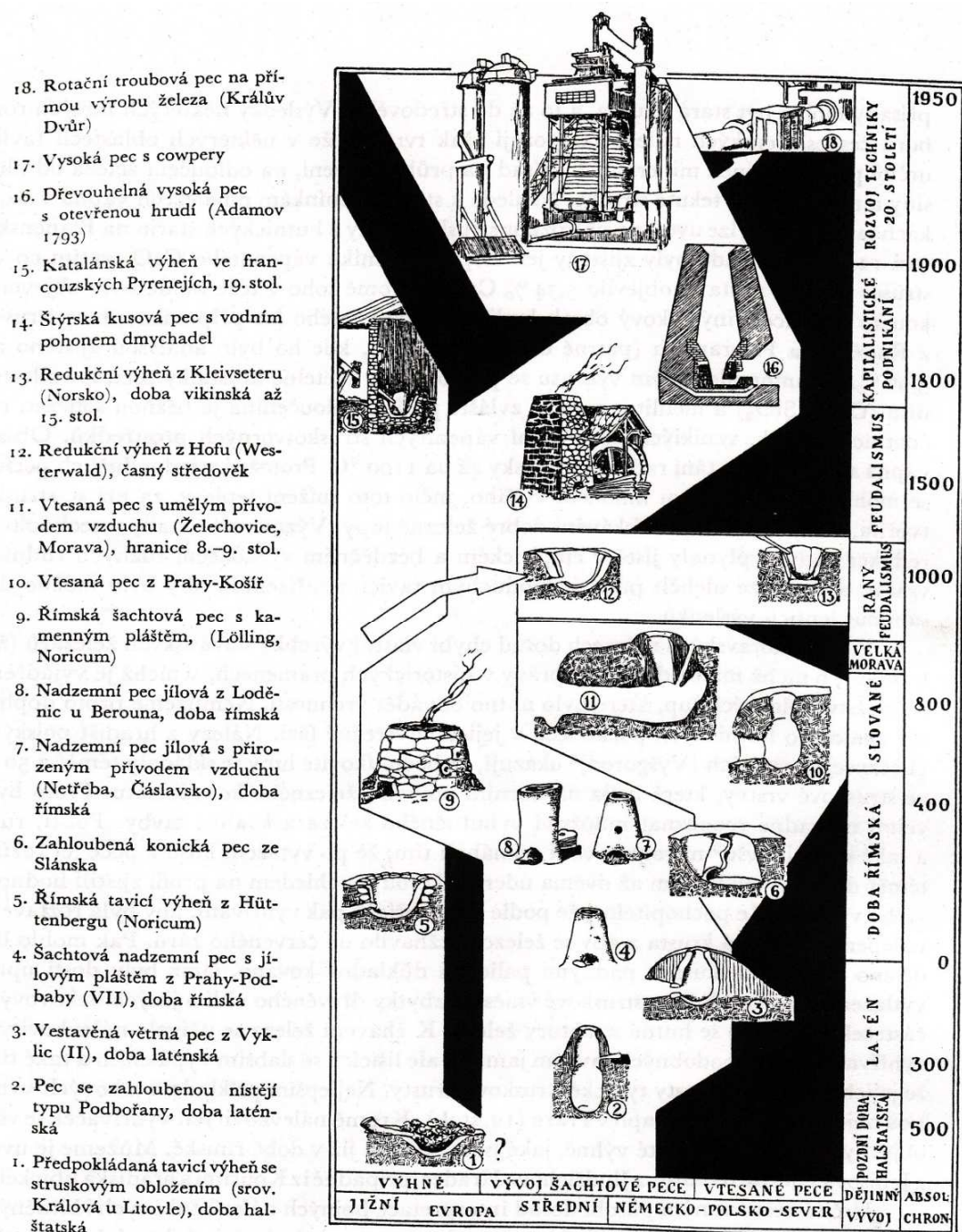
### **Slovanské železářství**

Po urovnání poměrů v kmenové příslušnosti populace po době stěhování národů v Evropě, byly někdy v 5. – 6. století osídleny naše země západo a východo slovanskými kmeny. Slovanští mistři byli schopni zásobit všechny obory lidské činnosti množstvím železných předmětů. Železáři, kteří pracovali již v plně organizovaných hutích (Želechovice), se stávali odbornými řemeslníky. Hutě byly zakládány v blízkosti surovinových zdrojů a nejčastěji pracovaly s typem vtesané železářské pece (viz. obr. 1. uprostřed). Pomalu se rozvíjel obchod s železnými polotovary/hřívnyami nebo již hotovými výrobky. Takto rozvinutý hutnický „průmysl“ byl v tomto období jedním z předpokladů zdárného rozvoje feudálních vztahů v českých zemích.

## **Vývoj hutnictví od změny letopočtu po současnost**

Hutnictví bylo klíčovou složkou v soustavě raně středověké řemeslné výroby a v této době již na něm začal záviset pokrok v mnoha oblastech hospodářství. Ve 13. až 16. století v Čechách existovalo na 250 železných hutí. V tomto období již lze hovořit o organizaci,

ekonomice a obchodu se železem a je to také období vznikajících hamrů (od počátku 14.st.). Koncem 16. st. se u nás začínají objevovat vysoké pece, které pracují na principu nepřímé redukce, kdy konečný produkt již není houbovitý, ale ve stavu tekutém s vyšším obsahem uhlíku, nazývaný surové železo (litina). V dřívějších podmínkách se surové železo upravovalo zkujňováním, tzv. *svárkováním*, kdy bylo vystavováno vysokému stupni oxidace v ohništích a vznikalo kujné železo, neboli v dnešní terminologii *ocel*. V 19. století došlo k velkému rozmachu a koncentraci hutnictví, rušení malých a ojedinělých pecí a výstavbě velkých hutí, využívající již plně nepřímou výrobu železa.



Obr. 1 Vývoj železářských zařízení (podle R. Pleinera 1958)



## II. SUROVINY UŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ ŽELEZA

### Železné rudy

#### Železná ruda a její druhy

Pod obecným pojmem ruda se rozumí hornina o takovém množství kovu a chemické vazbě, která je vyhovující pro využití v hutnictví.

Rudy se soustřeďují v místech, která nazýváme *rudnými ložisky*. Ta se podle vzniku dělí na *magmatická*, *hydrotermální*, *žilná*, nebo *sedimentární*. Dále železné rudy vhodné pro pravěké hutnictví dělíme podle toho, v jaké podobě je v nich železo obsaženo, na rudy *oxidické*, *křemičitany* a *uhličitany*. Pro tavby v dřívějších primitivních zařízeních byly nejvhodnější a nejsnáze redukovatelné rudy *oxidické*. Stručně uvedu některé druhy železných rud, které jsou vhodné pro využití v pravěkém železářství.

#### Hematit (krevel) $\text{Fe}_2\text{O}_3$

- snadno redukovatelná ruda, tmavě červené až ocelově šedé barvy
- spolu s  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  jsou považovány za nejdostupnější a nejsnáze redukovatelné rudy, uplatnila se jako základní surovina pro staré hutníky ve všech historických obdobích
- vyskytuje se v přírodě s 40 – 65 % Fe a malým množstvím dalších příměsí

#### Limonit (hnědel) $\text{Fe}(\text{OH})_3$

- velice snadno redukovatelná ruda, rezavé až hnědé barvy
- některé druhy hnědelů vznikají usazováním železitých vod, kdy se vytvářejí tzv. **bahenní rudy**, které jsou velice bohaté na železo
- obsahuje 28 až 45 % Fe, jinak je složení velmi různorodé

#### Magnetovec (Magnetit) $\text{Fe}_3\text{O}_4$

- tato ruda se redukuje velice nesnadno, charakteristický je svým černým zbarvením a magnetickými vlastnostmi
- obsahem je nejbohatší ruda na železo, 55 až 68 % Fe, s malým množstvím dalších příměsí

#### Ocelek (Siderit) $\text{Fe}(\text{CO})_2$

- ruda žlutého až našedivělého zbarvení s obsahem 25 až 40 % Fe a malým množstvím manganu a fosforu
- redukce sideritu není obtížná, je-li předem vypražen za přítupu vzduchu



Obr.2.,3.,4.,5. Charakteristické ukázky železných rud. Z leva do prava – Hematit, Limonit, Magnetovec, Ocelek.

## Výskyt a dobývání železných rud

Nejprve je nutné si uvědomit, že staří hutníci se neomezovali pouze na námi známá naleziště železných rud. V současné době je území České Republiky pokryto velkým množstvím povrchových nalezišť železných rud, která jsou pro potřeby současného hutnictví již nevhodná z důvodu absolutní vytěženosti bohatších ložisek. V dřívějších dobách hrála tato naleziště nepochybně velkou roli. S odstupem doby se staří železáři potýkali se stejným problémem jako my dnes, a to s nedostatkem bohatších zdrojů železných rud. Při řešení tohoto problému dávali přednost zpracování železa z chudších rud, nacházejících se v blízkosti jejich produkce, před dálkovým exportem z lokalit s bohatší rudou. V opačném případě by bylo mnohem snazší expedovat vytavené polotovary či finální výrobky.

V pravěku byly železorudné suroviny pro větší hutnické dílny získávány především formou povrchové těžby, výjimečně jsou v Evropě známy i doklady po důlní činnosti. Železáři s velmi nízkou produkcí si surovinu obstarávali i formou povrchových sběrů vhodné horniny. Důlní činností se rozumí namáhavé dobývání železných rud ražením jednoduchých jam a štol s použitím naprosto primitivních železných nástrojů a přírodních činitelů. Na území ČR není doložen žádný případ hloubkové důlní činnosti, ale zato máme bezpečně potvrzenou těžbu v místech povrchových oxidačních pásem nebo železorudných výchozů. Dokladem této povrchové těžby jsou rozměrné jámy, nejstarší archeologicky doložené z období latěnu.

*Těžba v takovémto prostředí nebyla nijak namáhavá, jak jsme měli možnost si sami vyzkoušet. Povrchovou těžbu jsme provedli na jednom z mnoha povrchových výchozů železné rudy ve Skuhrově nad Bělou v Orlických horách. V lesním porostu vystupoval přímo na povrch výchoz velice navětralé železné rudy, vyznačující se charakteristickým zbarvením půdy. Jednoduchými prostředky (motykami, lopatami) jsme rudu natěžili a lehce přebrali od*

*hlušiny. Obsah železa v těchto místních rudách nebyl vysoký, pohyboval se kolem 20 - 25 % Fe. Snadno přístupná ložiska bohatší na železo jsou v současné době v České republice v důsledku těžby trvající několik století již definitivně vyčerpána. Proto jsme nuceni při vlastních pokusech sáhnout po nabízených surovinách, které již ale nejsou autentická pro naše prostředí.*

## Úprava získané suroviny

Vytěžená ruda musela projít ještě úpravami různého druhu, než se mohla redukovat v železářských zařízeních. Vždy bylo nejdůležitějším krokem při úpravě získané suroviny zbavit rudu veškeré *hlušiny* a rozdrtit rudu na menší části z důvodu lepší redukovatelnosti. Další důležitou metodou při současném obohacování železné rudy je její pražení.

**Třídění** rudy se provádělo s cílem odstranit ze získané horniny nežádoucí hlušinu (hlinité a kamenité složky). Třídění bylo prováděno jednak ihned na místě těžby nebo až po drcení na místě spotřeby.

**Drcení** rudy se provádělo před samotnou tavbou nebo až po samotném pražení, kdy ruda ztratila svou tvrdost. Velikost drceného koncentrátu je úměrná velikosti výrobního zařízení. Optimální velikost se pohybovala od velikosti lískového ořechu, až po velikost drceného šterku. Některé železářny pracovaly i s rudou rozemílanou téměř na prach, ale v tomto případě hrozí nebezpečí zahlcení a znesnadnění průběhu tavby.

**Pražení** je přípravný proces na principu zahřívání suroviny za přístupu nebo nepřístupu vzduchu. V současné technologii se pražení provádí s hlavním cílem usnadnit práci samotné peci a zmenšit výrobní náklady.

Samotné pražení má několik základních cílů:

- uvolnit uhlík a síru z rud
- usnadnit redukovatelnost hutných a těžce redukovatelných rud
- zlepšit drtitelnost příliš pevných rud

S jistotou nelze říci, zdali staří železáři užívali pražení jako zaběhlou metodu při výrobě železa nebo jen při samotném redukčním pochodu, kdy je ruda v některých případech vystavená podobným účinkům jako při pražení.

Pokud k nějakému obohacování rudy docházelo, dělo se tak především cestou mechanické úpravy, než nějakým cíleným tepelným či chemickým působením.

## Palivo starých železářů



Obr.6. Ikonografie z roku 1540, znázorňující postup při výrobě dřevěného uhlí v uhelných jamách (podle Pleinera 1958).

*S jistotou můžeme označit dřevěné uhlí jako jediné užívané palivo od nejstarších dob až do poloviny 19.st., kdy bylo ve vysokopecním průmyslu pomalu nahrazováno ekonomičtějším koksem.*

### Historie pálení dřevěného uhlí

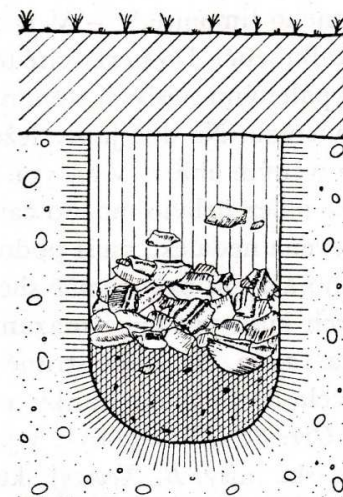
Historie výroby dřevěného uhlí je úzce spjata se samotným vznikem metalurgie. Jako počátek výroby v českých zemích lze označit minimálně starší neolit, kdy se uplatňovalo zároveň se vznikající metalurgií mědi.

O nejstarším způsobu pálení dřevěného uhlí nemáme příliš mnoho přesvědčivých důkazů, ale domníváme se, že proces zuhelnování dřevin probíhal v zahluubených válcových jamách (viz. obr. 7.) a uhlí si vyráběli sami hutníci pro své potřeby. Postup pálení v těchto **uhelných jamách** probíhal nejspíše tímto způsobem:

Nejprve se válcová jáma hluboká asi 1 m pod úroveň terénu zaplnila kletím a zbytkovým dřevěným materiálem (pařezy, nahnilé dřevo...). Po zapálení dříví zvolna hořelo a po určité době byl přístup vzduchu zamezen

utěsněním horního otvoru zeminou a omazáním hlínou.

V této izolační vrstvě mohlo být dále vytvořeno několik otvorů pro zlepšení regulace zuhelnatění dřeva.



Obr. 7 Praha - Bubeneč, jámové uhlíště z doby laténské (podle B. Novotného)

Postupem času se hutníci naučili rozeznávat rozdílné vlastnosti dřevin vhodných pro různé oblasti v tomto oboru. Při výrobě paliva do železářských pecí nejčastěji sahalo po tvrdém dřevu z listnatých stromů, které výrazně ovlivňovalo pochody v železářských zařízeních.

Rostoucí produkce železné výroby byla přímo závislá na dodávání velkého množství dřevěného uhlí, tudíž se přistupovalo k produktivnějším metodám výroby.

Ve středověku a na počátku novověku je z archeologických průzkumů potvrzena výroba dřevěného uhlí v nadzemních *milířích*. Již se jednalo o činnost značně rozšířenou, přinášející značnou spotřebu dřeva znamenající velmi citelný zásah do přírodních zdrojů, projevuující se velkým nedostatkem dřeva.

K samotné konstrukci milíře:

Obecně je milíř označován jako objekt ze svisle naskládaných polen kolem středového kůlu do kuželovité stavby, pokryté vrstvou drnů a mazanice. Pro názornost uvedu základní typy milířů, užívaných od středověku u nás i v zahraničí:

### **Milíř německý**

Opisuje půdorys kruhu a tvar polokoule, kdy střed zemité podstavy milíře pozvolna převyšuje okolní terén. Středem celého milíře prochází svisle zaražené kůly, obložené snadno hořlavým materiálem, nejčastěji kletím. Této konstrukci se říká „*král*“ či „*knot*“. Kolem tohoto jádra milíře jsou natěsno do kruhu svisle naskládaná polena v potřebném množství řad. Na toto vyrovnané dřevo následují další dvě izolační vrstvy složené z drnů, mechu, chvojí a hlíny promíšené s *mourem* (uhelný prach).

### **Milíř slovanský**

Konstrukčně se velice podobá milíři německému, ale liší se v několika dílčích prvcích. Krále tvoří dvě polena zaražená do země v dostatečné vzdálenosti vůči sobě a dosahující pouze výšky první vrstvy narovnaných polen. Slovanský milíř se zapaluje oproti německému zespodu pomocí zápalného kanálu, vzniklého dodatečným vytažením příčného polena.

### **Milíř alpský**

Milíř stojí na základně z paprskovitě poskládaných polen z jehličnanu, přes které se dále příčně paprskovitě vrství zbývající polena. Král bývá sestaven ze tří tyčí procházejících celou výškou milíře. Zapálení může probíhat jak spodními kanálky, tak i obdobně jako u německého typu vsypáním žhavých uhlíků do svrchní části krále.

Doba pálení milířů je závislá na velikosti stavby. Etnografické údaje udávají, že doba zuhlení se u menších milířů o velikosti 2 - 4 m pohybuje od 3 do 7 dnů a u větších milířů o rozměru 5 - 10 m okolo 8 až 15 dnů.

## Proces výroby dřevěného uhlí

Pálení dřevěného uhlí, označováno také jako pyrolýza nebo suchá destilace, představuje jednoduchý chemický proces, při němž zahříváním dřeva bez přístupu vzduchu dochází k uvolňování vody, vzniká  $\text{CO}_2$  a množství dalších plynů.

Reakce začíná při  $270^\circ\text{C}$ , kdy dřevo zpočátku hoří za plného přístupu vzduchu. V této fázi je přívod vzduchu omezen na minimum. Do  $300^\circ\text{C}$  je reakce velmi rychlá, vzniká až 75% produktu. Při teplotě  $350 - 400^\circ\text{C}$  vzniká už jen malé množství zuhelnatělého dřeva, tedy dřevěného uhlí.

Kvalitu dřevěného uhlí ovlivňuje několik důležitých faktorů:

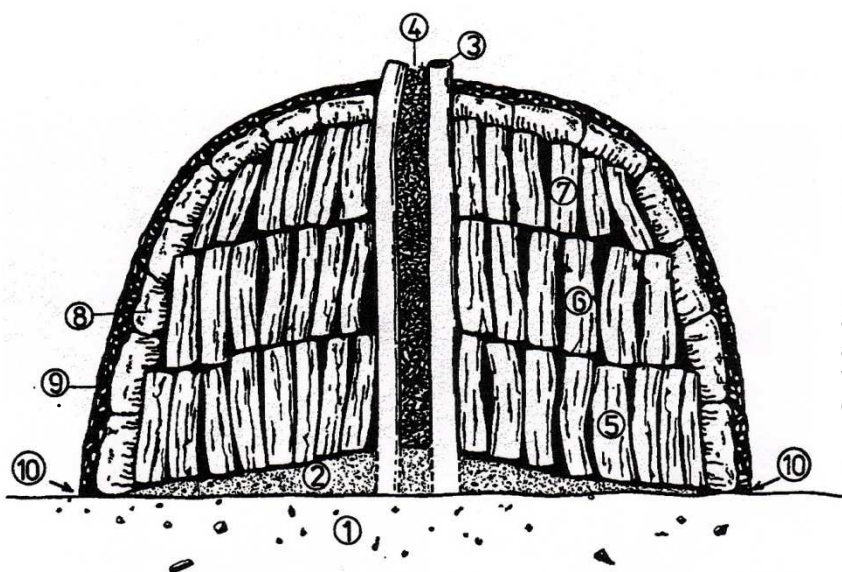
Dřevo vhodné k zuhelnatění by mělo být z listnatých dřevin středního stáří a starších jehličnatých, kácených mimo vegetační období. V milíři by nemělo dojít k směšování různých druhů dřevin z důvodu rozdílné rychlosti při zuhelnatování. Obecně platí pravidlo, že čím je milíř větší, tím je větší množství i kvalita uhlí. Kvalitně vypálené dřevěné uhlí by nemělo hořet plamenem, produkovat dým a černit.

Zároveň s výrobou dřevěného uhlí vzniká v milíři i **dehet**, který je vedlejším produktem výroby. V minulosti se hojně používal na impregnaci oděvů a obuvi, upravování kůže, impregnaci dřevěných součástí a pro mnoho dalších všedních operací.

## Pokusné pálení dřevěného uhlí v milíři

Ve dnech 14.8.-19.8.2007 jsme realizovali ve středověkém archeoskanzenu **Villa Nova v Uhřínově pod Deštnou** v Orlických horách pokusné pálení dřevěného uhlí v milíři s cílem vytvořit dostatečnou zásobu dřevěného uhlí, které bychom následně využili v různých metalurgických pokusech.

Pro pálení jsme zvolili typ milíře, který obsahoval dílčí konstrukční prvky ze všech tří zmíněných milířů (německý, slovanský a alpský). K dispozici jsme měli pouze bukové dřevo několika měsíčního stáří a jehličnaté dřevo velkého stáří o různé kvalitě. Z nedostatku paliva jsme sáhli po rozdílném druhu dřevin, celkem to bylo cca  $5 \text{ m}^3$  proschlého dřeva. Pokusného pálení se zúčastnilo 6 osob především z rodinného kruhu. Milíř jsme zakládali na příhodném, nevětrném, mírném svahu na místě, kde již dříve proběhlo několik výpalů milířů.



*Obr. 8. Řez milířem, jehož přibližné konstrukce bylo použito při pokusném pálení v srpnu 2007. 1. uměle vytvořená pracovní plošina; 2. kuželovitá hlinitá podstava; 3. čtveřice tyčí vytvářející „krále“; 4. snadno hořlavá výplň „krále“; 5. - 7. jednotlivé vrstvy polen (v našem případě pouze dvě); 8. drnový kryt; 9. kryt ze směsi hlíny a mouru; 10. umístění spodních vzduchových kanálků. (podle B. Dragouna)*

**1. den** – Základním bodem bylo vytyčení uhlíště o průměru 230 cm, se středovým terénním náběhem ve tvaru kuželu, převyšující okolní terén plošiny o 25 cm.

V dopoledních hodinách byl vztyčen „král“, následovně zaplněný klestím, a započato pokládání příčného paprskovitého roštu a vystavění dvou protilehlých vzduchových kanálků. V průběhu celého dopoledne dva lidé zajišťovali kopání čtvercových drnů (30x30 cm) a dopravovali je na kolečku ze vzdálenosti 70 m. Zároveň s nimi jeden člověk transportoval jílovitou hlínu z nedalekého „hliníku“ a průběžně vždy jeden člověk štípal špalky na poloviční nebo třetinovou velikost o délce 90 cm. Naskládání dřev natěsno a svisle ve dvou řadách trvalo dvěma lidem cca 3 h. Během následující hodiny pokrylo 6 lidí povrch celého milíře vrstvou drnů o přibližné síle 15 cm, kdy se postupovalo od spodní části směrem nahoru, a hlínou promíšenou s uhelným prachem se ucpali veškeré otvory vzniklé mezi položenými drny.

**2. den** – Okolo 5. hodiny ranní byl s východem slunce milíř zapálen pomocí vsypaných žhavých uhlíků do svrchní části krále. Během 1 hodiny se oheň rozšířil až do spodních partií a z celého pláště milíře se mezerami valil hustý štiplavý dým. Po 1,5 hodině od zapálení milíře byl vyhořelý král zaplněn poleny a ve vrchní části ucpán drnem. V této chvíli vnikal vzduch do milíře hlavně spodními kanálky, kde se dle potřeby reguloval. Tato fáze pálení, kdy se z milíře valil hustý kyselý dým, se nazývá *pocením milíře*. Toto trvalo přibližně 12 hodin.

V poledních hodinách se začala prudce naklánět severní strana milíře, což zapříčinila příliš mohutná polena na okrajích. Destrukci části milíře jsme zabránili okamžitým podepřením špalkem a utěsněním vzniklých otvorů hlínou a drny. Úhel naklonění se

v průběhu pálení již nezvyšoval. Po dobu noční části výpalu se držely hlídky, které kontrolovaly proces pálení.

**3. den** - Intenzita kouře se snížila na minimum a spolehlivým indikátorem pálení nám byl charakteristický zápach, vznikající při pyrolýze dřeva. Velice důležité při pálení byla pravidelná kontrola teploty v milíři, která byla dobře patrná při kontaktu s pláštěm. V místě, kde byla teplota nízká (nejvíce ve spodní části milíře), se prorazily rovným klackem díry, kterými vnikal do milíře vzduch a napomáhal rovnoměrnému rozložení teploty.

V odpoledních hodinách se ze svrchní části milíře odebralo zkušební množství dřevěného uhlí (cca. 30 kg) pro potřebu tavby v hutnickém zařízení. Většina z odebraného množství byla rovnoměrně přeměněna na kvalitní dřevěné uhlí, až na několik silnějších koncových částí polen, které neměly možnost zuhelnatět. Velikost milíře klesla na  $\frac{1}{2}$  původní výšky.

**4. den** – Stav milíře neměnný, hoření bylo usměrňováno otvory v plášti, milíř slabě namodrale dýmal a charakteristicky zapáchal. Mezery vzniklé vypálením dřeva jsme mechanicky zmenšovali, aby se zabránilo náhlému propadnutí pláště.

**5. den** - Milíř poklesl na  $\frac{1}{3}$  počáteční výšky.

V 11 hodin jsme se rozhodli pokus ukončit odstraněním drnové a hlinité vrstvy a rozhrnutím vzniklého uhlí do stran. Místa, kde docházelo k vznícení dřevěného uhlí, byla kropena vodou. V odpoledních hodinách byly z vychladlého uhlí vytríděny nevypálené kusy dřeva a následně bylo lehce navlhle uhlí s malými zbytky zeminy napytlováno.

Celkem bylo vypáleno **240 kg** dřevěného uhlí, což se přibližně rovná asi 1,5 m<sup>3</sup> a 30% výtěžku. Toto množství dřevěného uhlí by přibližně stačilo na uskutečnění 15 hutnických pokusů s výrobou železa v menších šachtových pecích.

## Problematika umělého přívodu vzduchu do pecí

Podmínkou správného průběhu tavby je nutnost neustálého umělého přívodu proudu vzduchu do výrobního zařízení. Vzduch byl ve většině případů pravděpodobně do pecí přiváděn pomocí různých typů měchů. Bohužel na evropské půdě nejsou žádné evidentní archeologické nálezy měchů, užívaných v pravěkých a středověkých železářských zařízeních pro dodávání proudu vzduchu, ze kterých bychom mohli při rekonstrukci výrobních pochodů vycházet.

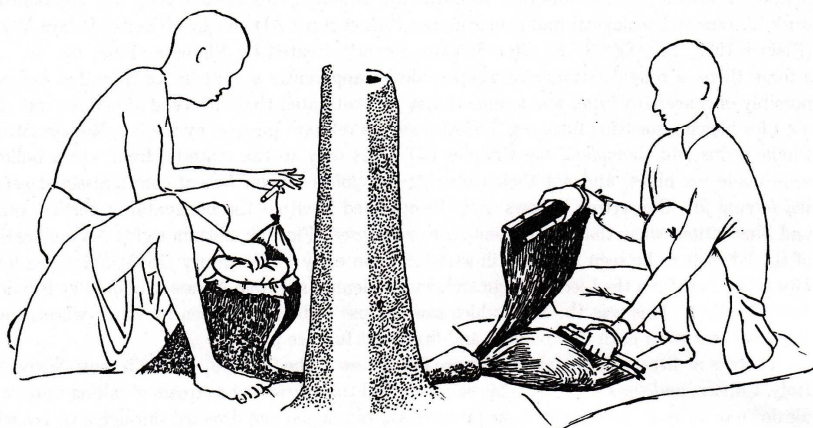


Inspiraci můžeme hledat u domorodých afrických kmenů, kdy ještě v polovině minulého století pracovaly jejich primitivní železářny s typem bubínkového měchu (*obr.č.9 vlevo*). Hrnčovitě měchy byly složeny z keramické a dřevěné nádoby s nabraným vzduchem. Ten byl vyhnán na spodku měchu skrze hlinitý tunel směrem do pece střídaným tlačáním na kožené víko nebo blánu, napnutou přes její vršek. Další možností mohou být klapkové harmonikové měchy (*obr. 10.*), které byly zavedeny v Evropě, ale až v období římském, jak ukazuje ikonografie. Některá zařízení mohla pracovat na principu přírodního zdroje vzduchu. Byla-li pec postavena na příhodném větrném svahu, mohl vzduch do pece proudit většími otvory při dnu zařízení. Byl tak velice jednoduše a bez námahy zajištěn pravidelný přísun vzduchu.

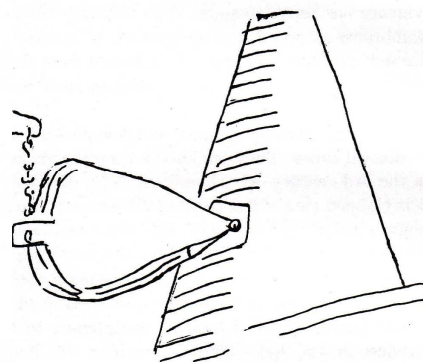
Můžeme se domnívat, že pravěcí hutníci využívali jednoduchého vaku nebo měchu ze sešitých párů zvířecích kůží, kterými střídaně stlačením a zdvihem obstarávali neustálý přísun vzduchu. Podobné zařízení jsme se pokusili vyrobit (*viz. obr. č. 9. vlevo nebo v příloze č. 8. foto 1.*) a následně jsme ověřili jeho funkčnost opakovaným uvedením do praxe.

V současné době při metalurgických experimentech zdomácnělo použití elektrických ventilátorů s konstantním přísunem vzduchu a výjimečně i použití ručního harmonikového měchu (*viz. příloha č. 8, foto 2.*).

Při vlastních metalurgických pokusech se snažíme preferovat použití ručních typů měchů, kdy je větší pravděpodobnost přiblížit se náročnosti a autentičnosti starých technologií.



**Obr. 9.** Tradiční měchy. Vlevo: bubínkové měchy, Matakamští železáři, Z. Afrika. Vpravo: jedna z možností použití vakových měchů (Podle Pleinera 2000).



**Obr.10.** Úsov, Morava, harmonikový měch na ikonografii z roku 1613 (Podle Pilnáčka 1926).

## II. VÝROBA ŽELEZA PŘÍMOU A NEPŘÍMOU METODOU

*Metoda přímé výroby zahrnuje doposavad nejdelší časový úsek výroby železa z rud.*

Obecně rozlišujeme redukci železa jako:

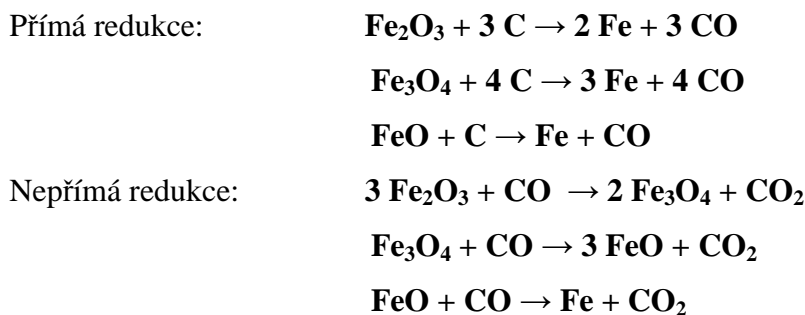
**Redukce přímá** – kdy reaguje uhlík s oxidy Fe za vzniku CO a

**Redukce nepřímá** – jako reakci CO s oxidy Fe za vzniku CO<sub>2</sub>

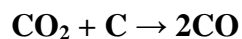
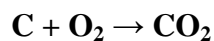
Jednoduše řečeno, v přímé redukci dochází přímo k výrobě železa a to tou nejkratší cestou. V moderní technice se většina železa vyrábí tavením rud v koksových *vysokých pecích*, kdy je hlavním produktem surové železo v tekutém stavu, ale s vyšším obsahem uhlíku (3 - 5 %) a nežádoucích prvků, které se s vysokou teplotou dostaly do železa. Tento produkt je velice tvrdý a křehký, proto se dále zpracovává v tzv. konvertorech metodou zkujňování (oduhličení) na principu zpětné oxidace uhlíku a ostatních prvků, a výsledkem je kujné železo nebo ocel. Tato metoda se pro svou složitost nazývá *nepřímou redukcí*.

Redukuje-li se však ruda při nižších teplotách, nepřijde nikdy do tekutého stavu a pojme jen nepatrné procento uhlíku. Železo se po nějaké době tavení shromáždí v určité části pece a za příhodných podmínek se svaří v *železnou houbu*. Touto *nepřímou redukcí* bylo vyráběno železo od nejstarších dob, až do 16 - 17. st., kdy bylo nahrazeno produktivnějším vysokopečním průmyslem. Produkty získané přímou metodou jsou výborně kujné a obsahují minimální množství škodlivých prvků (mangan, fosfor, síra...).

Dále uvedu pouze základní vzorce procesů, které probíhají při redukci železných rud.



Proces výroby železa v pravěkých „*dýmačkách*“ je popisován na základě principu přímé redukce. Ve skutečnosti má ale velký podíl na tvorbě železa i nepřímá redukce. Proces, který v peci probíhá, za účelem vzniku železa lze jednoduše popsat jako reakci železné rudy a reakčního média, v tomto případě CO<sub>2</sub>, který vzniká spalováním dřevěného uhlí a uhlíku (probíhající pouze v malém okruhu hoření dřevěného uhlí za největšího přístupu vzduchu).



Při hoření dřevěného uhlí za vysokých teplot vzniká oxid uhelnatý (viz výše), který při teplotě nad 600°C stoupá vsázkou a reaguje s kousky železné rudy za vzniku železa. I v místě největší teploty (okolo 1350°C) zůstává železo po celou dobu v pevném stavu a k natavení dochází pouze v mikroobjemech.

Z toho vyplývá, že výsledek je nikoliv tekoucí roztavený kov, ale nevzhledný spečenec části kovu, strusky a zbytků paliva v pevném, těstovitém stavu, označovaný jako *železná houba*. Tento polotovar je nutné ještě dále kovářsky zpracovávat, aby se odstranila nežádoucí struska a jednotlivé kousky železa mohly být kovářsky svařeny do požadovaného polotovaru.

## IV. POKUS O REKONSTRUKCI VÝROBY ŽELEZA V NĚKTERÝCH TYPECH PRAVĚKÝCH PECÍ

Velice podstatným krokem pro vytvoření ucelené představy o pravěkém hutnictví železa byla realizace několika metalurgických pokusů. Cílem bylo praktické seznámení se s omezenými prostředky starých železářů a tímto primitivním způsobem vytvořit optimální prostředí pro vznik železa.

Převážná část těchto metalurgických pokusů probíhala v areálu zahrady č.p.8 v Sebranicích, okres Svitavy, v časovém úseku červen - září 2007 a březen – duben 2008. Součástí těchto letních metalurgických pokusů byly i další pra-archaické akce určené pro obeznámení veřejnosti s touto technologií. Proběhla stavba rekonstruované pravěké hrnčířské pece a následná série několika výpalů ručně vyrobené keramiky nebo velice oblíbené pečení chleba v hliněné chlebové peci. O samotném hrnčířství nebo přípravě pokrmů v historických obdobích by se dala vypracovat samostatná obsáhlá práce. Tento letní projekt byl financován z projektu „*Make a Connection*“, určený pro vzdělávání a rozvoj mládeže a akce prospěšné okolí svého konání.

K realizaci samotných pokusů velkou měrou přispěly konzultace s členy sdružení „*Experimentální archeologie Všešary*“, jmenovitě Doc. PhDr. Radomír Tichý, Ph.D., Mgr. Richard Thér nebo s Mgr. Bohumírem Dragounem z archeoskanzenu Uhřínov pod Deštnou, ohledně železa s PhDr. Jiřím Mertou z Technického muzea v Brně.

### **Pokusné tavby v miskovitých zahloubených pecích**

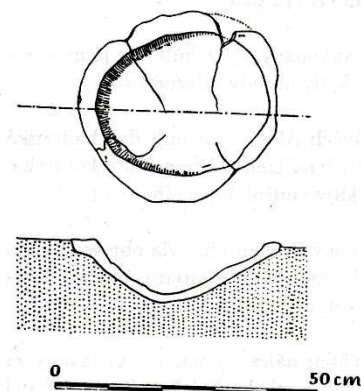
Jedním z neodmyslitelných způsobů výroby železa v Evropě je i ten nejstarší a nejprimitivnější v zahloubených miskovitých pecích (výhních) z doby Halštatské. Při našich tavbách jsme se řídili typem pece nalezeným na sídlišti Bylanské kultury v Praze – Hloubětíně (R. Pleiner; 1958 str. 84.).

Konstrukčně se pec neliší od vyhřívacích výhni používaných v několika následujících stoletích. Jedná se o zahloubenou kruhovou jámu, vymazanou žáruvzdorným materiálem, o

průměru 35 cm a hlubokou 11 cm. S tímto typem jsme prozatím uskutečnili dvě zkušební tavby dne 15.3.2008 v areálu zahrady domu č.p. 8 v Sebranicích.

**První série taveb (2 tavby)** – tavba č.1. (dále jen T1) probíhala souběžně s T2 pro lepší porovnání rozdílností pochodů (viz. tabulka v příloze č.1.), zapříčiněné v první řadě zvolením rozdílných zdrojů umělého přívodu vzduchu. U T1 byl zvolen jako zdroj vzduchu elektrický ventilátor o konstantním přívodu přibližně 45 l vzduchu za minutu (měřeno velice orientačně metodou zavzdušnění igelitového pytle při ústí zdroje vzduchu a následné změření objemu). U druhého pokusu (T2) posloužil jednokomorový kožený klapkový měch (příloha č.8., obr. 2.) o přibližném objemu 40 l a přerušovaném přívodu vzduchu (zapříčiněné dvoufázovým dmýcháním - nádech/výdech) přibližně 60 l vzduchu za minutu. Železorudná vsázka sestávala při obou tavbách ze  $\frac{2}{3}$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve formě drcených pelet o 64% obsahu železa, získané ze slévány ve Žďáru nad Sázavou a z  $\frac{1}{3}$  vytavenou struskou z předchozích taveb (viz. níže) s vyšším obsahem železa, získané z předchozích taveb v šachtových pecích, použité pro zlepšení struskotvorných vlastností. Rudná vsázka byla drcena na přibližnou velikost hráškového zrna. Palivem pro obě tavby posloužilo kvalitní dřevěné uhlí z tvrdého a měkkého dřeva, pálené v milíři. Uhlí bylo před použitím drceno na velikost vlašského ořechu a vlhčeno vodou.

Stavba pícky proběhla v obou případech těsně před samotnou tavbou ze směsi jílovito-sprašové zeminy s menší příměsí písku a dřevouhelného mouru. Přívod vzduchu byl vyústěn pomocí keramické dyzny (keramická trubice) o vnitřním průměru  $T1=16\text{mm}$  a  $T2=12\text{mm}$ , zavedené přes okraj pícky pod úhlem  $35^\circ$  od roviny terénu a zasahující do  $\frac{1}{4}$  šířky pece. Tavba byla započata ve vlhké pícce rozděláním ohně a částečným vysušením hořícím dřevem a později uhlím. Doba přehřevu se pohybovala u T1 30 min. a T2 40 min. Se vsázkou železné rudy se započalo ve chvíli, kdy teplota rovnající se minimálně  $850^\circ\text{C}$  (světle třešňově červená barva) byla dobře pozorovatelná alespoň ve  $\frac{2}{3}$  šířky pece. U T1 byla ruda vkládána ve 250 g dávkách po dobu 2 hodin o celkovém množství 2,25 kg. Jednotlivé vsázky rudy byly prokládány 250 g vlhčeného dřevěného uhlí. Při T2 vsázku tvořily střídavě 100 g rudy a 250 g vlhkého uhlí po dobu 2,5 h v celkovém množství 1,8 kg železné rudy. Teplota vyšší než  $800^\circ\text{C}$  se držela pouze ve  $\frac{2}{3}$  šířky pece směrem od přiváděného vzduchu. V následující fázi za stálého přívodu vzduchu bylo přidáváno jen dřevěné uhlí po dobu T1 4,5 h a T2 1,5 h.



Obr. 11. Praha- Hloubětín; vymazaná miskovitá výheň z bylanského sídliště (podle B. Soudského 1953)

Vrstva uhlí převyšovala o 7 cm horní úroveň pece. Při nahlédnutí pomocí kovové tyčky do prostoru uvnitř pece byl v obou případech dobře pozorovatelný jakýsi těstovitý útvar, tvořící se v horní části pícky, ale na dně byly patrné drobné slitky ochlazované přiváděným vzduchem. Ke konci tavby, kdy vsázku tvořilo jen dřevěné uhlí, se teplota rovnoměrně rozložila po celé ploše pícky a byly dobře pozorovatelné namodralé plamínky vznícených kychtových plynů. Nutno podotknout, že teplota podle vizuálního posouzení nepřekročila v obou tavbách 1150°C. Po ukončení dmýchání byla T1 téměř okamžitě demonstrována vyhrábnutím obsahu mimo plochu pícky a za tepla vytříděny zbytky paliva od žhnoucích spečenců. Po vychladnutí se přešlo k přebrání produktů tavby. 20% obsahu tvořila přetavená železná ruda na dně pece a zbytek celistvý struskovitý spečenec velice porézní, v lomu bublinaté strusky o velmi malé měrné hmotnosti, nacházející se při okraji vrchní roviny pece. K demonstraci T2 došlo až po 14 hodinách pasivního období, kdy se lépe lokalizovaly studené vytavené produkty. Výsledkem T2 byly z větší míry pouze přetavené a spečené kousky rudy s malým množstvím vytvořené strusky. Povrch železoruďného spečence byl silně zoxidovaný přebytečným přívodem vzduchu. V žádné z taveb pravděpodobně nevzniklo železo v metalickém stavu.

Následným důležitým pokusem bylo vysledování hloubky propálení výhně č.1 a srovnání s dochovaným nálezem. Slabá povrchová vrstva červeného vypálení se nachází pouze na 2/3 plochy výhně směrem od přiváděného vzduchu a k hlubšímu propálení došlo jen v malém okruhu vyústění dyzny. Ostatní části jsou jen slabě poznamenány působením vysoké teploty. Obrázková dokumentace v příloze č. 4.

**Závěrem:** Podle získaných výsledků lze těžko usuzovat o správnosti zvolených postupů. Pouze lze poukázat na fakt, že množství přiváděného vzduchu bylo příliš vysoké a doba tavby byla naopak příliš nízká.

**Druhá série taveb (2 tavby)** – T3 proběhla dne 18.4.2008 v areálu zahrady č.p.8 v Sebranicích a T4 dne 3.5.2008 zároveň s R6 při Dni živé archeologie v archeoskanzenu Všešary u Hradce Králové.

Tavby proběhly v rekonstrukci železářského zařízení z Prahy - Hloubětína, postavené bezprostředně před samotnou tavbou z jílovito - sprašové zeminy (více tabulka 3 v příloze č.1). Zdrojem vzduchu pro obě tavby posloužil vakový kožený měch (viz. příloha 8, foto č. 1), s průměrným přívodem T3 - 45 dm<sup>3</sup>/min a T4 - 40 dm<sup>3</sup>/min vzduchu. Dyzna směřovala v obou případech do středu pece a zasahovala do ¼ šířky, ale sklon se od počáteční tavby přiblížil vodorovné poloze, T3 - 20° a T4 - 12° od roviny země. Redukovaly se dva druhy

železných rud. U tavby T3 tvořila vsázka houbovitá masa z R3 v obou případech drcená na velikost hráškového zrna a u T4 byla použita železná ruda nasbíraná na polích v okolí Sebranic s obsahem okolo 10 % Fe. Před samotnou tavbou bylo zařízení č.3 vysoušeno a přehříváno dřevěným uhlím po dobu pouhých 10 min a zařízení č. 4 až 1 h a 15 min. Doba, kdy byla rudná vsázka o množství 1 kg a 2,1 kg vystavena redukčnímu prostředí, se pohybovala u T3 okolo 3 h a T4 - 5 h. Rychlost průchodu železné rudy činila u T3 - 0,57 kg/h a T4 - 0,42 kg/h. S rudnou vsázkou se přisypávalo i kvalitní suché dřevěné uhlí o max. velikosti vlašského ořechu v poměru 5:1 vůči rudě. Výsledkem obou taveb bylo malé množství strusky a zbytek tvořily přetavené kousky rudy.

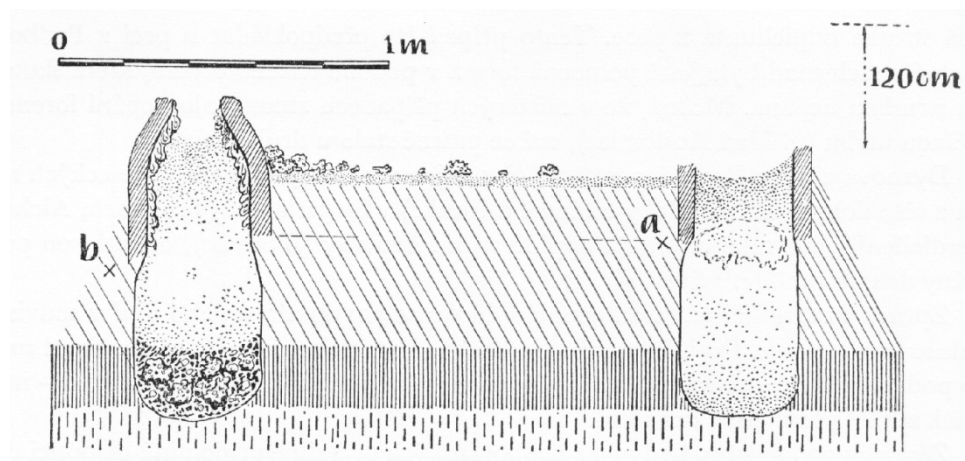
**Závěr:** Při obou tavnách nevzniklo žádné železo, ale pouze malé množství strusky. To bylo nejspíše zapříčiněné nevhodností zvolené železné rudy (malý obsah železa, případně vysoká teplota tání strusky). Ze získaných poznatků lze předběžně vyvodit základní opěrné body pro následné pokusné tavby v hloubětínském zařízení. Vsázka, tvořená kvalitní železnou rudou o maximální velikosti hráškového zrna a dřevěného uhlí, by měla odpovídat váhovému poměru 1:5. Dále by množství přiváděného vzduchu nemělo překročit hladinu 50 dm<sup>3</sup>/min a optimální sklon dyzny, vložené přes okraj pícky, by se měl pohybovat mezi 10-20°. Tolik závěrem z dosavadních taveb v miskových píckách.

## **Pokusné tavby v šachtových pecích typu Podbořany**

Pokusné redukce v šachtových zahlobených pecích byly realizovány v rekonstruovaných pecích podle archeologického nálezu laténské huti v Podbořanech (podle R. Pleinera; 1958 str.119.), (viz. obr. níže).

Pec č.1. se dochovala celá a byla postavena ze speciálně připravené žáruvzdorné směsi, následkem taveb vypálená do běla. Ve tvaru komolého válce o vnitřním průměru 30 cm a mírně zaklenutou horní částí/kychtou na 20 cm. Žáruvzdorná konstrukce o síle 10 cm vyčnívala o 40 cm nad terén, ale dalších 50 cm byla zapuštěna do země a zakončena kotlovitou nístějí. Spolu s objevem dvou tavicích zařízení byla nalezena i dyznová cihla, která dokazuje možnost umělého přívodu vzduchu do pece.

Každá redukce probíhala jiným způsobem a za jiných podmínek, proto věnuji každému pokusu vlastní část textu.



Obr.12. Podbořany-  
laténská huť

## Redukce I.

Tavba proběhla dne 1.8.2007 v areálu zahrady č.p.8 v Sebranicích, které předcházela stavba pece s dvou týdním předstihem. Prvotní nezkušenosti při stavbě pícky zapříčinily některé konstrukční chyby, které neodpovídají nálezoové situaci, a negativně se projevily i v průběhu samotné tavby. Tavící zařízení bylo postaveno z dovezené směsi jílu a spraše s menším množstvím písku a pojené obilnými klasy (složení viz. příloha č.1, tabulka č. 3.). Konstrukce pece o vnitřním průměru šachty 37 cm a šířka kychty 15 cm následně zamezila rovnoměrnému vkládání suroviny. V čelní části pece s úrovní terénu byla vyhloubena dutina o rozměrech 25x15 cm pro vodorovné usazení dyznové cihly a lepšímu vyjmutí produktu tavby. Pec z jedné poloviny dodatečně zapašněna do umělého terénu pro lepší izolační vlastnosti. Před tavbou byla nístěj naplněna slámou, čímž se ušetřilo dřevěné uhlí, které by jinak zaplnilo nístěj. Tavilo se s nepraženými a nedrcenými *peletami* (průmyslově upravený železo rudný koncentrát o velikosti kuličky 8-20 mm) a složením 90 %  $Fe_2O_3$ , 7 % oxid křemičitý a menší množství dalších prvků. Kompletní složení viz. příloha č.1, tab.4. Jako palivo posloužilo nedrcené komerční dřevěné uhlí. Vyschlá pec byla předehřívána dřevěným uhlím za stálého dmýchání po dobu 1,5 h, pak se přistoupilo k střídavému přisazování rudy a paliva. Vsázka sestávala z dávek 500 g Fe rudy a stejného množství dřevěného uhlí po dobu 3 hodin. Průměrná rychlost průchodu vsázkou činila 4kg/hod. Hoření bylo podporováno stálým dmýcháním jednokomorovým koženým měchem o velice přibližném množství 100  $dm^3/min$  vzduchu.

Po 6,5 hodinách otevřeného chladnutí byla vylomena dyznová cihla a vyhrábnut obsah pece. Po přebrání byla tavba konstatována jako neúspěšná. Z větší části výsledek tvořily přetavené a spečené pelety, které byly použity v následujících tavbách. Sláma uložená v nístěji zůstala neporušená.



Na stavu pece ponechané působení vnějších vlivů podnebí můžeme v březnu 2008 pozorovat pouze lokální vypálení pece do červeného odstínu a způsob, jakým dochází k destrukci pece. Po několika měsících nezůstane prakticky žádný viditelný doklad o železářském výrobním zařízení.

(Fotodokumentace taveb a destrukce pecí je v příloze č. 6. a 9. a souhrnné parametry všech taveb v příloze č. 1., tab. 2.)

## **Redukce II.**

Tavilo se dne 12.8.2007 na pokusné ploše v areálu zahrady č.p.8 v Sebranicích za odborného dohledu pracovníků z TM Brno. Stavba stále stejného typu pícky probíhala za teplého slunečného počasí dva dny. První den proveden výkop a výmaz nístěje a stavba části šachty, následující den dokončení celé pece a výroby dyznové cihly (průměr vnitřního otvoru 16 mm). Po týdenním vysychání byla nístěj zaplněna opět slámou až po ústí dyznové cihly a započato tavení, vsypáním žhnoucích uhlíků do šachty pece. Doba přehřevu dřevěným uhlím po dobu dvou hodin stačila pro vytvoření redukční atmosféry, projevující se vznícením kychtových plynů (CO) nad kychtou. Vsázka sestávala z drcených pelet z předešlé tavby o průměrné velikosti hráškového zrna a komerčního dřevěného uhlí o přibližné velikosti 3-5 cm, střídavé sázení ve 250 g dávkách. Vzduch byl uměle přiváděn pomocí jednodukomorového měchu o přibližném objemu 40 l, kdy do pece proudilo okolo 100 dm<sup>3</sup>/min. Po ukončení vsázky železné rudy bylo dmýcháno jen za přidávání dřevěného uhlí po dobu 1 h. Následně byla čelní část pece ve vzniklých prasklinách vylomena a vyhrábnut obsah pece. Výsledkem byl jeden větší a několik menších spečenců o celkové váze 1000 g, množství trusky a neredukované rudy. Největší houbovitý útvar (10x10x5 cm) plochého oválného tvaru, v řezu s patrnou strukturou metalického železa ve tvaru půlměsíce, byl lokalizován při vyjímání z pece ve středu šachty v úrovni dyznové cihly.

Za celkovou dobu 7 hodin tavení se spotřebovalo 13 kg železné rudy (pelet) a 26 kg dřevěného uhlí. Výsledkem byla menší houba o váze 800 g a odhadovaným obsahem 20% metalického železa ve tvaru pláště neredukovaných pelet. Tento produkt není možné dále kovářsky zpracovat, jelikož postrádá pospolité propojení železných částic do určité kostry, ale můžeme jej zařadit do vsázky při další tavbě.

Propálení pece je rovnoměrně červeného zabarvení ve všech částech, protože nebyla použita sláma a proces tavení byl úspěšnější než předešlý. Tato pec je ve skutečnosti

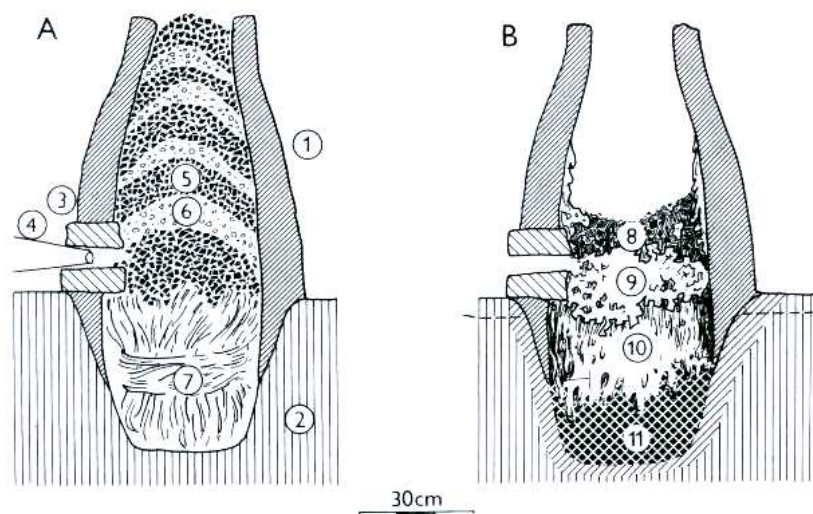
„vypálená cihla“, u které je možnost, že v příhodných podmínkách vydrží i několik let (viz. fotografie v příloze č. 9.).

*Rád bych poděkoval pracovníkům TM v Brně za odbornou pomoc a obětavé dmýchání.*

### Redukce III.

Pokusná tavba probíhala v archeoskanzenu Villa Nova Uhřínov pod Deštnou dne 18.8.07. Konstrukce stavěné pece odpovídá nálezům, byla stavěna za vlhkého a deštivého počasí po dobu 3 dnů. Ke stavbě byl použit místní jíl, množství dřevouhelného mouru a suché slámy. Nístej byla vystlána čerstvým větrovým a slámou. Byl proveden pokus o napojení dvou vzájemně se doplňujících měchů pod úhlem 90° a směřující vyústěním dyznové cihly do středu pece. Předhříváno bylo nejprve dřevem a poté dřevěným uhlím po 2 hodiny. Doba chodu pece s přísazováním 250 g dávek železné rudy a ve stejném poměru i dřevěného uhlí se rovnala 5 hodinám, když v polovině tohoto času muselo být z technických důvodů odstaveno jedno z dmychadel (shořelo). Průchod rudné vsázky pecí činil 3,1 kg/h za přivádění průměrně okolo 120 dm<sup>3</sup> vzduchu/min. Celkem bylo spotřebováno 30 kg uhlí a 16 kg drcených pelet. Po 1 h a 20 min dmýchání bez žádné vsázky byla pec postupně rozebrána. Výsledný produkt po zbavení přebytečné strusky a natavené rudy vážil 5,5 kg a obsahoval jen zanedbatelné množství kovového železa, houbu tvořila především struska o velice vysokém obsahu železa ve formě oxidů.

Závěr: Použití dvou měchů v takto malém zařízení je zbytečně komplikované a přebytečné množství vzduchu zapříčiňuje jen zbytečnou ztrátu železa, které přechází do strusky.



Obr. 13. Rekonstrukce železářské pece typu Podbořany  
 A – stav před tavbou; 1. plášť pece; 2. podloží; 3. dyznová cihla; 4. dmychadlo; 5. dřevěné uhlí; 6. železná ruda; 7. sláma, nebo proutí;  
 B – stav po tavbě; 8. zbytky paliva; 9. železná houba; 10. struska; 11. vyhořelé palivo  
 (podle Pleinera 2000)

## Redukce IV.

Pokusná tavba probíhala v centru experimentální archeologie Věstary u Hradce Králové ve dnech 30.8 a 1.9 2007. Postavená pec se skládala z jílovito-sprašové směsi, pojené velkým množstvím travin. Rudná vsázka byla tvořena drcenými peletami na velikost hráškového zrna a dřevěného uhlí o velikosti vlašského ořechu, páleného v milíři. Pec byla 1 h a 15 min. přehřívána dřevem a následně žhavana dřevěným uhlím. Při dmýchání jsme se setkali s problémem malého přísunu vzduchu do pece, který byl zapříčiněn malým otvorem v dyznové cihle (10 mm), ale ve výsledku se to následně projevilo velice příznivě.

Za 5 h a 15 min pec pojmula jen 7 kg rudy a rychlost průchodu vsázky šachtou činila 1,4 kg/h a o přívodu přibližně 50 dm<sup>3</sup> vzduchu/min. Tavba byla přerušena pouze z důvodu předpokládané neúspěšnosti, ale mohlo se pracovat ještě několik hodin. Produkty tavby ponechány bez přístupu vzduchu v redukční atmosféře chladnout skoro 18 h. Poté byla stále žhnoucí nadzemní část pece převrácena mimo pracovní plochu a po dodatečném výmazu prasklin schopná další tavby. Houbovitý útvar byl v tomto případě nataven na stěnu pece nad úrovní dyznové cihly. V peci se nacházelo i množství neredukované rudy a struskových slitků. Železná houba o váze necelých 3 kg v řezu nasvědčovala úspěšnému vytvoření železa, které se při výrobě tvořilo na protější straně od přiváděného vzduchu. Zbytek objemu houby tvořila struska s velmi vysokým obsahem železa.

## Redukce V.

Tavba probíhala dne 13.10.2007 v areálu zahrady č.p.8 v Sebranicích. Pec ze směsi jílu, spraše a slámy byla postavena především za účelem tavení nízko železité rudy z povrchových výchozů ze Skuhrova nad Bělou. Rudu s obsahem 20 - 25% Fe jsme pražili v oxidační atmosféře 1 h v otevřeném ohni a následně ji drtili na velikost cca 1 cm. Proces výroby železa probíhal již zaběhnutými metodami. 1 h přehřívání, necelých 6 h chod pece s 250 g vsázkami železné rudy a 10 h pasivní období, kdy se z produktu v redukční atmosféře případně odtavovala struska a chladnul. Celkem vsazeno 14 kg rudy a 24 kg vlhčeného dřevěného uhlí vyrobeného v milíři. Vzduch procházel 20mm otvorem v dyznové cihle a jeho objem se pohyboval se okolo 100 dm<sup>3</sup>/min a vsázka průměrně klesala 2,5 kg/h. Samotný průběh tavby vypadal velice slibně a přirozeně, po celou dobu nad kychtou hořely modré až nafialovělé plamínky CO a žhnoucí uhlíky vystoupily až po úroveň kychty.

Výsledkem tavby bylo veliké množství strusky s vyšším obsahem železa. Na vnitřních stěnách až po vnější okraj šachty se natavila a zesklivatěla struska.

Závěr: Podle mého názoru bylo docíleno optimálního výrobního prostředí, schopno z rud bohatších na železo, než jsme nyní použili, vyredukovat a svařit železný produkt. I přes nulový výtěžek, tavbu považuji za velice úspěšnou.

## **Redukce VI.**

Tavba probíhala dne 3.5.2008 v archeoskanzenu Všešary u Hradce Králové. Cílem tohoto pokusu bylo ověřit možnost výroby železa z nízko železitéch rud, nasbíraných na polích v okolí obce Sebranice.

Stavba pícky již zaběhlého konstrukčního typu byla za slunečního počasí postavena na 2 h z předem připravených a vysušených formovaných částí, použitý materiál viz. příloha č. 1 v tabulce 3. Po 1 h přehřevu se průběh tavby jevil velice klidně. Během 5,5 h bylo vsazeno 5 kg polní hematitové rudy o obsahu okolo 10 % železa, drcené na velikost hráškového zrna, a celkem okolo 25 kg dřevěného uhlí. Průměrná rychlost průchodu železné rudy nebo dřevěného uhlí činila 1 kg/h při přívodu 90 dm<sup>3</sup>/min vzduchu pomocí jednodemového harmonikového měchu. Teplota naměřená belgickými taviči ke konci tavby při ústí výfučny dosahovala 1210°C. Teplota byla měřena digitálním termočlánkem. Bezprostředně po ukončení tavby byla pec rozbořena a vyjmut houbovitý produkt, natavený na dyznové cihle. Jednotlivé stavební prvky pece jsou schopné opakovaného použití. Vytavený polotovár o váze 2,25 kg byl rozříznut a vybroušen. Na protější straně od zdroje vzduchu je ve velkém množství velice pórovité sklovité strusky obsaženo menší množství metalického železa. Výsledek tavby lze vzhledem k rudě s nízkým obsahem železa označit jako úspěšný. Průběh tavby se již jeví velice ustálenou formou.

## **Závěr ze získaných poznatků**

Na základě zhodnocení výsledků a získaných parametrů z těchto šesti taveb lze poukázat na několik důležitých poznatků, které výrazně ovlivnily proces redukce. Na první místo bych řadil jako významný činitel jakost a druh zpracovávané železné rudy, která výrazně ovlivňuje vznik železa. Dalším důležitým faktorem je i množství vhaněného vzduchu, se kterým přímo souvisí i rychlost průchodu vsázky šachtou. Je-li dmýchání příliš slabé, nedosahuje se tak vysokých teplot a nedochází k oddělení strusky od železa, je-li naopak vzduchu přebytek, následkem zpětné oxidace nastává zbytečná ztráta železa, která

přechází do strusky. Doba aktivního chodu pece je zároveň rozhodující při redukcí železné rudy. Ovlivňuje jednak množství vsazené železné rudy, tudíž i potencionální výtěžek, ale i čas, při kterém jednotlivé kousky železné rudy přicházejí do kontaktu s redukčním médiem a ovlivňuje tak množství vznikajícího železa. Domněnka o efektivnosti pasivního období tavby se nám zatím při tak malých a rozdílných výsledcích taveb nepodařila potvrdit. Množství nahličení železa, případně chemické složení železa a železné strusky, potvrdí až chemické rozborů, kterými budeme v nejbližší době některé vzorky podrobovat.

Výsledky z těchto pokusných taveb dokazují, že v rekonstrukci Podbořanského železářského zařízení lze pomocí nejjednodušších prostředků a s minimálními znalostmi chemických pochodů, poměrně jednoduchou cestou získat železo.

## **Rekonstrukce hutnictví železa v pravěku**

*Nyní bych rád shrnul dosavadní zkoumání a praktické experimentování v oboru pravěkého hutnictví do stručného celku, alespoň částečně vypovídající o dřívějším železářství na území střední Evropy.*

### **Rekonstrukce halštatského hutnictví**

Pokusíme-li se rekonstruovat halštatské hutnictví, tak máme k dispozici jen omezené množství hmotných dokladů, které by napomohly vytvořit obraz o hutnické výrobě ve starší době železné. Budeme-li vycházet z toho, co nám halštatské hutnictví zanechalo, tak jsou to především ojedinělé nálezy železných strusek v blízkosti sídelních objektů nebo v hrobech, výjimečně nálezy výrobních zařízení (Praha Hloubětín, Králové na Litovelsku). Můžeme se domnívat, že halštatské hutníci vyráběli železo v nevelkém rozsahu v primitivních vyhřívacích objektech (viz obr. č. 9.) Rudné suroviny mohly být získávány formou povrchových sběrů nebo povrchovou těžbou v povrchových výchozech zvětralých ložisek. Řízené obohacování rudy mohlo být prováděno nejvýše formou mechanickou (třídění a drcení). Použití rud se omezovalo na oblast, ve které se hutníci vyskytovali, nejčastěji se jednalo o lehce tavitelné hnědely a krevely. Jako palivo bezpečně posloužilo dřevěné uhlí, které mohlo být vyráběno v uhelných jamách (viz kap. č. 3).

Samotný proces výroby železa ve vyhřívačkách si můžeme jen těžce představit. Hoření dřevěného uhlí mohlo být podporováno umělým přívodem vzduchu pomocí měchů z organických materiálů, které se nám nedochovaly. Po několika hodinách tavení železných rud se mohlo na dně pícky vytvořit množství železa, které bylo pohlceno tekutou struskou, a tak muselo dojít k novému tavení s tímto polotovarem a vsázkou nové rudy. Po několika tavebách mohl vzejít minimální výtěžek ve formě houbovitého železa, promíšeného s množstvím strusky, které se pak ve stejném zařízení kovářsky odstraňovalo a zisk železa z několika taveb se svařil do požadovaného polotovaru.

*Proces to byl jistě časově velice náročný a získaný produkt určitě neodpovídal vloženému úsilí, přesto se železářství během pár století vyvinulo tak, že historičtí Keltové na něm postavili základy své železářské éry.*

## **Rekonstrukce laténského hutnictví**

Pokusit se znovu objevit zaniklé laténské hutnictví se nejeví takovým problémem jako u hutnictví halštatského. V tomto období se již můžeme pevně opřít o určité konstrukce výrobních zařízení a s určitou jistotou napodobit zaniklé technologické postupy. Redukce byly prováděny v nízkých polozahloubených šachtových pecích vzájemně si podobné konstrukce, nejlépe reprezentovatelné nálezy z Chýně nebo Podbořan. Šachty pecí o výšce 50 cm a vnitřním průměru 40 - 30 cm byly stavěny ze žáruvzdorné zeminy, schopné odolávat několika opakujícím se tavebám. Pece pracovaly na umělý přívod vzduchu, jak dokazují nálezy dyzen nebo dyznových cihel. Železné suroviny, se kterými se hutníci potýkali, byly tvořeny především limonitickými rudami, případně hematitovými rudami, které ale byly nějakým způsobem vystavované předběžnému pražení, přímé doklady o tom nemáme. Rudy se získávaly formou povrchové těžby, jak dokazují dochovalé těžební jámy v okolí některých *oppid*. Podle uskutečněných pokusů můžeme průběh tavby celkem spolehlivě popsat. Postavená pec po důkladném vysušení prošla první, přípravnou fází výroby železa, a to předehtáním na potřebnou teplotu (1100°C), která se projevuje stálým hořením kychtových plynů namodralým plamínkem. Předehtávání se mohlo provádět jak z počátku dřevem, tak následně dřevěným uhlím. Následovala další fáze přísazování železné rudy do pece spolu s palivem. Vsázka byla tvořena drcenou a (praženou) železnou rudou a dřevěným uhlím ve stejném hmotnostním poměru. Hoření dřevěného uhlí bylo stále podporováno vhnáným vzduchem pomocí měchů. Jednotlivé kousky rudy klesaly vsázkou a reagovaly s CO, nebo v místě největšího žáru přímo s uhlíkem (dřevěným uhlím). Vznikající železo postupně

---

klesalo do níštěje, vznikalo i množství železné strusky, která, jelikož byla lehčí než železo, se tak držela nad ním a zabraňovala sekundární oxidaci vytvořeného železa. Za příhodných podmínek bylo železo svařeno v kompaktní *železnou houbu*. Tavba končila po několika hodinách usilovného dmýchání, kdy byl produkt vyjmut. Dělo se tak více způsoby: jednak pomocí kleští šachtou pece nebo otvorem po dyznové cihle nebo způsobem jakým jsme to aplikovali my, a to odklopením nebo odvalením šachty pece a pohodlným vyjmutím produktu. Vyjíměčně se mohla pec i rozbít. Výsledný produkt dosahoval maximálně 20% železa z množství vsazené rudy a obsahoval ještě velké množství strusky, která byla mechanicky odstraňována a odtavována ve vyhřívacích zařízeních a železo následně kovářsky zpracováno. Finální produkt zbavený strusky mohl tvořit jen **5-10% železa** z množství vsazené železné rudy.

Exportním a prodejním produktem keltů byly *dvojhroté hřivny* o váze 6-7 kg.

Zvláštní poděkování na závěr patří panu Radomíru Pleinerovi z AU ČR za excelentně zpracovaný přehled hutnictví do 12. věku a především celé mé rodině za ochotu spolupracovat a podílet se na tomto náročném projektu.

## **Oponentský posudek práce**

Mojmír Mazánek, SUPŠ Turnov



Předložená práce se zabývá praktickým výzkumem a ověřením znalostí o historických technologiích v praxi. Vzhledem k zaměření studia autora se pochopitelně věnuje hlavně výrobě železa a jeho slitin.

Výzkum pravěkých technologií se dnes ubírá třemi hlavními cestami. Jednak jsou zkoumány všechny reálné možnosti, které lze při výrobě určitého předmětu uplatnit.

Za druhé jsou konány pokusy s použitím různých technologických postupů a výsledky jsou srovnávány s archeologickými předměty.

Za třetí se s největší možnou pečlivostí studují stopy, které pravěká funkce předmětů zanechala na předmětech samých.

Studentská práce obsahuje všechny tři tyto cesty v různém stadiu rozpracovanosti. Dostačující je úvod do historie hutnictví, který čtenáři pomůže objasnit historické souvislosti vývoje technologie výroby železných kovů od prvních stop až po současnost. Ve střední části se podrobněji zabývá technologickými, fyzikálními a chemickými podmínkami výroby těchto kovů a pomocných surovin, v rozsahu dostačujícím pro středoškolskou úroveň.

Nejvýznamnější částí je třetí, která popisuje praktické pokusy s výrobou a úpravou surovin potřebných k výrobě a částečně (vzhledem k výsledkům pokusů) i následným zpracováním takto získaného kovu. Ověřuje se zde reálnost těch postupů, které jinak poznáváme převážně jen v literární formě (obvykle jen teoreticky dovozené), a současně umožňuje vytvořit materiální předměty, které by byly archeologickými metodami srovnatelné s pravěkými. Metodou pokusu lze objevit také takové technologické postupy, které nebyly doposud zachyceny jinými vědeckými metodami.

Na této části je obdivuhodný rozsah a vcelku jejich kvalitní systematické provádění, dobrá dokumentace i s realistickým závěrečným hodnocením. Rozporuplné výsledky dosavadních organizačně, materiálně i časově velmi náročných pokusů musíme vidět v kontextu historických fakt, kdy se tyto technologie postupně vyvíjely spíše stovky než jen desítky let a to v mnoha lokalitách. Jejich znovuobjevení je pro jedince nesmírně náročný úkol a aby byl proveditelný v relativně krátkém časovém úseku je nutné do pokusů zapojit i nemalé znalosti z moderních věd o chování těchto materiálů a i přesto je to pro člověka dnešní doby velmi náročný úkol. Drobné metodologické nedostatky nebo spíše zjednodušení jsou na této úrovni plně opodstatnitelné.

Provedené pokusy jsou na středoškolskou práci rozsahem i obsahem velmi kvalitní a na jejich výsledcích je možné úspěšně pokračovat ve snaze o dokonalé zvládnutí těchto historických technologií, ať už je provede sám autor, nebo někdo další. Práce neopomíjí ani hodnocení provedených pokusů srovnávacími metodami s archeologickými nálezy.

**V Turnově dne 25.3.2008**

**zpracoval: Mojmír Mazánek**  
učitel technologie SUPŠ Turnov

## Posudek práce

PhDr. Jiří Merta, Technické muzeum v Brně

Předložená práce je dokladem samostatného přístupu řešitele k složité otázce redukce železných rud přímou výrobou v kusové železářské peci. Je samozřejmé, že k praktickému řešení problému bylo zapotřebí prostudovat dostupné odborné texty, jimiž jsou bezesporu zejména práce profesora Radomíra Pleinera, který se výzkumem metod užívaných starými železáři zabývá již více jak půl století. Výhodou uvedených materiálů je bezesporu jejich odborná erudice při srozumitelném podání problému metalurgických pochodů, doplněných popisem a nákresey situací, zjištěných při archeologických nálezích. Hlavně z těchto materiálů Jiří Kmošek vycházel (viz jeho historický úvod k historii výroby železa v pravěku českých zemí) se zřetelem k metalurgii železa Keltů, o kterou se zajímá a kterou ověřil experimenty.

Je třeba ocenit teoretické zvládnutí a orientaci při řešení problému s maximálním využitím dostupné literatury, ale hlavně úspěšné rozvinutí získaných teoretických poznatků při vlastním složitém metalurgickém procesu redukce železa v kusové šachtové peci. Vlastní tavbu předcházely výběr a příprava užití Fe rudy pražením a drcením, ale i výroba potřebného paliva – dřevěného uhlí – mířováním za pomoci celé rodiny! Výše uvedenými experimenty se v současné době zabývají početné erudované týmy řady evropských univerzit a odborných ústavů. Výsledky jejich bádání při využívání řady nejnovějších přístrojů pro sledování a dokumentaci metalurgických pochodů při redukcí železa jsou srovnatelné s experimenty Jiřího Kmoška, které takovou materiálovou základnu a podporu samozřejmě postrádají. Popis jednotlivých experimentů dobře postihuje jejich průběh a výsledek tavby. Text je doplněn schémata a názornou fotodokumentací dokládající průběh a dění při jednotlivých experimentech.

Předložená práce má velmi dobrou odbornou úroveň. Zvláště je třeba vyzdvihnout zvládnutí dokumentace jednotlivých experimentů i přehledné vedení záznamů o jejich průběhu. Pozoruhodné jsou výsledky samostatně řízeného průběhu všech experimentů a způsob jejich vyhodnocení. Dále je třeba podle mého názoru ocenit osobní nasazení a zájem autora experimentů o širší problémy sledování projevů každodenního života protohistorické společnosti.

Z uvedených důvodů hodnotím předloženou práci jako velmi dobrý přínos při rekonstruování dnes již zaniklých výrobních pochodů a technologií. Vysoce si vážím zaujetí a hlubokého zájmu Jiřího Kmoška, který s oporou a s pomocí celé rodiny dosáhl výše uvedených výsledků.

PhDr. Jiří Merta  
Technické muzeum v Brně

V Brně 9. května 2008

*Poznámka:* Jiří Kmošek referoval o výsledcích experimentů na 27. semináři Archeologia Technica v Technickém muzeu v Brně (15. dubna 2008). Přednesený referát vzbudil zájem zúčastněných – většinou odborných pracovníků muzeí, pracovišť Národního památkového ústavu a řady dalších zájemců, kteří ocenili jeho vystoupení i dosažené výsledky.

## Seznam použité literatury

- BOROVEC A. – BARTOŠ J. Výroba kovů I.*; Praha 1977  
*DRAGOUN B. – MATOUŠEK V. Archeologie ve středních Čechách 8*, str. 727-772; Praha  
*MALINOVI R. a J. Vzpomínky na minulost*; Ostrava 1982  
*PLEINER R. Základy slovanského železářského hutnictví v českých zemích*; Praha 1958  
*PLEINER R. Iron in archeology*; Praha 2000  
*STRÁNSKÝ, K. - SOUCHOPOVÁ, V. - MERTA, J.; Archeologia technica 11*  
Rekonstrukce pochodů přímé výroby železa z rud, str. 12. - 22.; Brno 1999

## Seznam použitých internetových serverů

- <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezo>  
<http://starahut.com>  
<http://antrak.cz>

## Zdroje obrázků

- Obr. 1.,7.,11.,12. - PLEINER R. - Základy slovanského železářského hutnictví... (viz. výše)  
Obr. 9.,10.,13. - PLEINER R. – Iron in archeology (viz. výše)  
Obr. 2.,3.,4.,5. - <http://cs.wikipedia.org>  
Obr. 6.,8. - DRAGOUN B. – MATOUŠEK V. Archeologie ve středních Čechách 8

## **PŘÍLOHY**

## PŘÍLOHA Č.1 – Tabulky

Tabulka 1. Parametry jednotlivých taveb v zařízení typu Praha-Hloubětín				
Datum tavby	15.3.2008	15.3.2008	18.4.2008	3.5.2008
Označení tavby	T1	T2	T3	T4
Doba přehřevu [h]	0,5	0,7	0,15	1,25
Doba aktivního chodu pece [h]	2	2,5	1,75	5
Doba chodu po ukončení vkládání rudy [h]	4,5	1,5	1,35	0
Průměrná rychlost průchodu Fe rudy [kg/h]	1,125	0,75	0,57	0,42
Množství vsazené rudy [kg]	2,25	1,8	1	2,1
Kovnatost rudy [%]	2/3 - 89% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a 1/3 – Fe struska		Houba z R3	10-15% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Spotřeba dřevěného uhlí [kg]	12	10	9	14
Množství přiváděného vzduchu * [dm <sup>3</sup> /min]	55	70	45	40
Sklon dyzny [°]	35°	35°	20°	12°
* Hodnota měřena orientačně				

Tabulka 2. - Parametry jednotlivých taveb v zařízení typu Podbořany						
Datum tavby	5.8.2007	12.8.2007	18.8.2007	1.9.2007	13.10.2007	3.5.2008
Označení tavby	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Výtěžek z množství vsazené rudy * [kg/ %]	0 /0,00	0,8 /6,20	5,53 /34,60	2,95 /42,10	0 /0,00	2,25 /45,00
Průměrná rychlost průchodu železné rudy a paliva vsázkou [kg/h]	4	2,3	3,1	1,4	2,5	1
Množství vsazené rudy [kg]	12	13	16	7	14	5
Kovnatost Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> rudy [%]	89 %	89 %	89 %	89 %	20-30 %	10-15 %
Spotřeba dřevěného uhlí [kg]	20	26	30	19	24	25
Množství přiváděného vzduchu ** [dm <sup>3</sup> /min]	108	100	120	50	104	90
Doba přehřevu [h]	1,5	2,15	1,85	1,25	1,1	1
Doba aktivního chodu pece [h]	3	5,75	5,25	5,25	5,7	5,5
Doba pasivního chodu pece [h]	6,5	1	1,35	17,65	10,5	0
Průměr pece v úrovni dyzen/průřez [cm/ dm <sup>2</sup> ]	37/10,7	35/9,6	35/9,6	30/7,1	30/7,1	30/7,1
Objem pece + nístěj [dm <sup>3</sup> ]	34+28	43+26	30+33	32+50	32+40	32+30
* Houbovitý útvar s nezaručeným množstvím metalického železa						
** Hodnota měřena orientačně						

Tabulka 3. - Použitý materiál při stavbě pecí

Označení tavby	R1	R2	R3	R4	R5	R6	T1	T2	T3	T4
Typ pece	P*	P	P	P	P	P	H**	H	H	H
Materiál										
Sprašová zemina	45,00 %	50,00 %	-	45,00 %	53,00 %	75,00 %	40,00 %	40,00 %	55,00 %	50,00 %
Jílová zemina	40,00 %	40,00 %	80,00 %	45,00 %	40,00 %	5,00 %	40,00 %	40,00 %	30,00 %	50,00 %
Písek	8,00 %	10,00 %	-	-	-	10,00 %	10,00 %	10,00 %	10,00 %	-
Uhelný popel	-	-	15,00 %	-	-	5,00 %	10,00 %	10,00 %	5,00 %	-
Organická pojiva	7,00 %	-	5,00 %	10,00 %	7,00 %	5,00 %	-	-	-	-

\* Zařízení typu Podbořany  
\*\* Zařízení typu Praha - Hloubětín

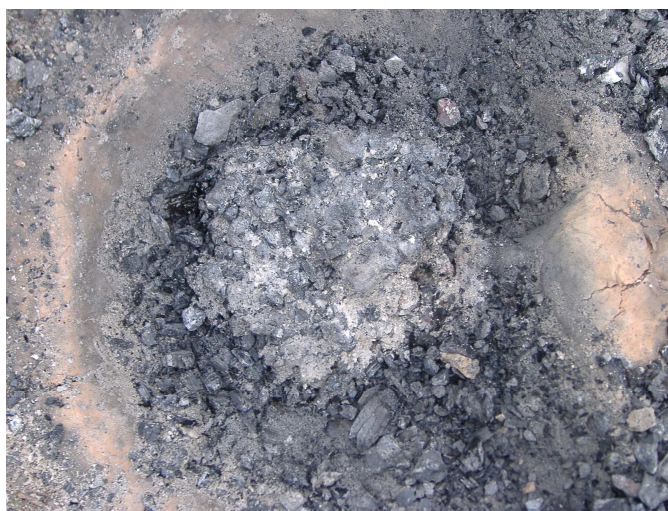
Tabulka 4. – Chemické složení železorudných pelet

Chemické složení	Ukazatel	Typická analýza	Jednotka
Oxid vápenatý	CaO	1,58	hm. %
Oxid hořečnatý	MgO	0,166	hm. %
Oxid křemičitý	SiO <sub>2</sub>	7,36	hm. %
Oxid hlinitý	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22	hm. %
Mangan	Mn	0,02	hm. %
Fosfor	P	0,007	hm. %
Síra	S	0,0089	hm. %
Železo	Fe	63,55	hm. %
Oxid železitý	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88,85	hm. %
Oxid železnatý	FeO	1,72	hm. %
Oxid draselný	K <sub>2</sub>	0,15	hm. %
Oxid sodný	Na <sub>2</sub> O	0,06	hm. %
Oxid titaničitý	TiO <sub>2</sub>	0,002	hm. %
Zinek	Z	0,002	hm. %
Chrom	C r	0,004	hm. %
Olovo	Pb	0,0001	hm. %
Vlhkost	Wt	2,00	hm. %
Granulometrie		3 – 25 mm	

## PŘÍLOHA Č. 2. - Fotodokumentace pálení dřevěného uhlí v milíři



PŘÍLOHA Č. 3. – Průběh pokusné tavby železa v miskových pecích (Tavba 2)



PŘÍLOHA Č. 4. – Sonda vypálení do pece č.1

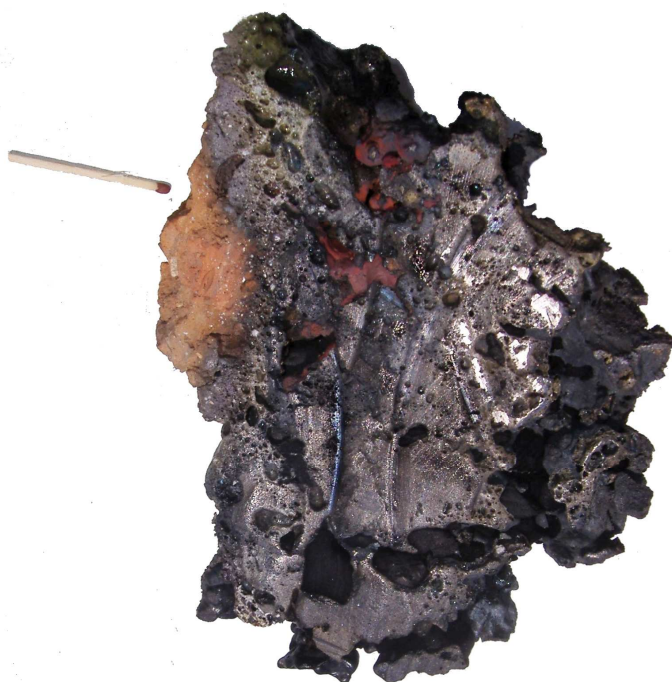
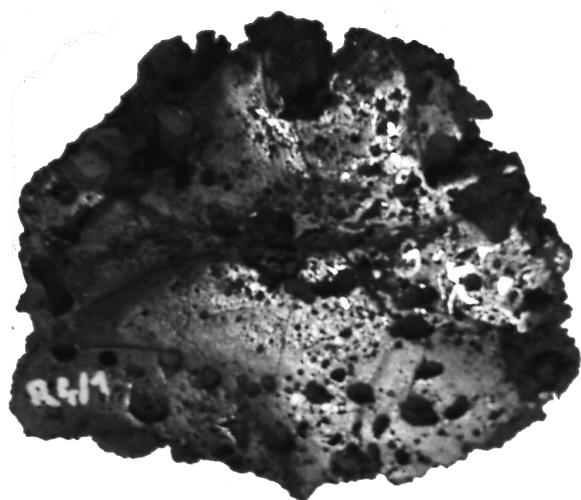
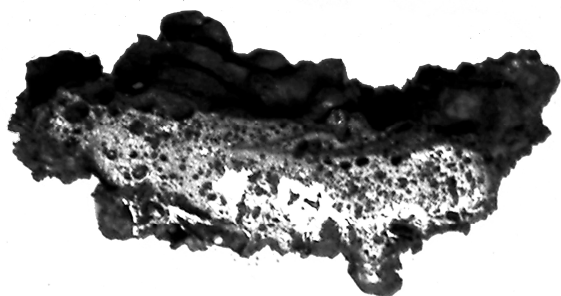




## PŘÍLOHA Č. 5. – Pokusné tavby železa v šachtových pecích typu Podbořany



## PŘÍLOHA Č. 6. – Produkty jednotlivých taveb



PŘÍLOHA Č. 7. – Přibližná rekonstrukce dmýchacích zařízení



PŘÍLOHA Č. 8. – Destrukce redukčních zařízení č.1 a č.2 (stav k 1.3.2008)



## **Popis fotografií k přílohám 2-8.**

*(číslováno z levé do pravé strany, po řádcích)*

- Příloha č. 2.; Foto 1. – Stavba milíře, vztyčení krále a položení dvou vzduchových kanálků  
Foto 2. – Pohled do krále a na vyrovnané palivo, určené k zuhelnatění  
Foto 3. - Počátek obkládání dřevěné části milíře izolační vrstvou z drnů  
Foto 4. - Stoupající kyselý kouř - 1,5 h po zapálení  
Foto 5. - Stav milíře po 3. dni pálení  
Foto 6. - Rozebírání milíře – 5.den
- Příloha č. 3.; Foto 1. - Stav pece č.2. před tavnou  
Foto 2. - Počátek tavby v peci č.2, rozehtívání dřevěného uhlí  
Foto 3. - Průběh tavby č.2  
Foto 4. - Výsledek tavby č.2
- Příloha č. 4.; Foto 1. - Sonda vypálení pece č.1 po jedné tavně
- Příloha č. 5.; Foto 1. - Šachta zařízení č.6 – stav před tavnou  
Foto 2. - Průběh redukce č.6  
Foto 3. - Výsledek redukce č.6, natavený na dyznovou cihlu  
Foto 4. - Průběh redukce č. 4  
Foto 5. - Rozebírání zařízení č.6  
Foto 6. - Rozebírání zařízení č.2  
Foto 7. - Vznícené kychtové plyny při redukcí č.5
- Příloha č. 6.; Foto 1. - Řez produktu redukce č.2 (Na fotografiích 1.-3. byl vzduch přiváděn vodorovně z levé strany)  
Foto 2. - Řez produktu redukce č.4  
Foto 2. - Řez produktu redukce č.6  
Foto 4. - Produkt redukce č.3 (vzduch přiváděn vodorovně z čelního pohledu)
- Příloha č. 7.; Foto 1. – Přibližná rekonstrukce koženého vakového měchu  
Foto 2. – Přibližná rekonstrukce dřevo-koženého harmonikového měchu
- Příloha č. 8.; Foto 1. - Destrukce redukčního zařízení č.1  
Foto 2. - Detail propálení redukčního zařízení č.2, při ústí výfucen  
Foto 3. - Destrukce redukčního zařízení č. 2