

T A V B A 2 0 1 3

Tavba železné rudy v rekonstrukci středověké pece

Dominika Adamcová



Gymnázium Přírodní škola, o.p.s., 2013

Autor: Dominika Adamcová
Datum odevzdání práce: 13. 11. 2013
Konzultant: RNDr. Marek Matura, Ph.D.

Gymnázium Přírodní škola, o.p.s.
Strossmayerovo nám. 990/4
170 00 Praha 7

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěla poděkovat Marku Maturovi za odborné vedení a konzultace při realizaci tohoto projektu. Na úspěšném průběhu stavby má zásluhu také celá moje rodina, která mi pomáhala při samotné stavbě pece a tavbě. Zejména děkuji tátovi Ottovi Adamcovi za dopravu jílu, a pomoc při přípravných pracích a také za podporu při tom, když bylo potřeba přikládat celou noc do pece a řešit vzniklé problémy. Děkuji také mámě Evě Adamcové za dopravu 50 kg dřevěného uhlí a železné rudy, povolení postavit pec na naší zahradě a finanční a psychickou podporu. Sestrám Marušce a Kristýně Adamcovým za pomoc při šlapání vepřovice a plácání komínu pece. Díky patří také Vaškovi Šňupárkovi a znovu Marku Maturovi za pomoc s kutáním a dopravou železné rudy. V neposlední řadě děkuji sdružení Cesta domů za zapůjčení tranzitu na dovoz skoro tuny jílu.

OBSAH

1	Úvod	1
2	Problematika získávání železa.....	2
2.1	Historie zpracování železa ve světě	2
2.2	Historie zpracování železa na našem území	2
2.3	Úprava a tavba rudy ve středověku	4
2.4	Chemické reakce při procesu tavby	4
2.4.1	Nepřímá redukce	4
2.4.2	Přímá redukce.....	4
3	Typy železných rud	5
4	Použité suroviny.....	6
4.1	Jíl	6
4.2	Uhlí	7
4.3	Železná ruda	7
4.3.1	Geologický vývoj zrudnění	7
4.3.2	Charakter rudy.....	8
5	Stavba pece.....	9
5.1	Přípravné práce	9
5.2	Stavba pece	10
6	Průběh tavby.....	10
6.1	Tavba	10
6.2	Konečná fáze vyjmutí vytaveného materiálu	11
7	Výsledky a závěr	12
7.1	Vytavený materiál.....	12
7.2	Možné negativní vlivy na výsledek tavby	12
8	Použitá literatura	13

1 Úvod

Kovem naší civilizace je železo. Je nedílnou součástí každodenního života a má nesčetné množství využití. Tuto surovinu znal člověk už před rokem 3000 př. n. l. Zprvu bylo jeho získávání a zpracování velmi obtížné a železných předmětů, se kterými se obyčejný člověk běžně setkával, nebylo mnoho. Až do 18. století se železná ruda získávala jen pomocí ručních nástrojů. Dnes už ale železné předměty bereme jako samozřejmost. Velké množství předmětů denní potřeby je právě z tohoto kovu, což je možné díky tomu, že jak získávání, tak zpracování železa jsou velmi dobře zvládnuté procesy. Člověk tak ani nepřemýšlí o tom, kde a odkud se tento kov bere. Princip těžby železa zůstává stále stejný, ale moderní prostředky těžbu výrazně usnadňují a zlevňují.

Na území České republiky se nacházela řada ložisek železné rudy. Dobývky na území Ralské pahorkatiny nebyly z hlediska množství a kvality rudy příliš významné. Dobývání zde probíhalo na většině míst povrchově, ale jsou i výjimky a dnes můžeme vidět i zajímavé štoly a šachty. Štoly a šachty lze najít na lokalitách, kde bylo zrudnění bohatší, a těžba postupovala do větších hloubek. Typově se jedná o vulkano-sedimentárním zrudnění, které je vázáno na žilná tělesa bazických vyvřelin. Tyto struktury jsou v literatuře někdy nazývány jako “polzenity” podle německého názvu řeky Ploučnice. Dostupná literatura se v názoru na charakter těženého materiálu příliš neshoduje. Například server Geologické lokality uvádí, že těžen byl limonit a jílové minerály, Strážský zpravodaj Vatra ve svém článku jako těžený materiál uvádí zase jílovou železnou rudu a také o těženém materiálu spekuluje. Ve starších českých pramenech je materiál popisován ještě jako zpevněný pískovec bohatý na železo. Některé ze zdejších důlních děl jsou podrobně popsány a zmapovány ve sborníku Báňská díla 2013 (citace). Autoři se zabývali také složením rud Ralské pahorkatiny. Předložená práce si klade za cíl na tuto práci navázat a experimentálně ověřit, zda bylo možné vytavit železo z jílovitého materiálu, který se dodnes nachází na některých dobývkách Ralské pahorkatiny. Tento materiál by totiž mohl být hledanou těženou rudou. Vytavením a získáním železné houby by bylo možné prokázat dostatečný obsah železa v tomto materiálu a tak i skutečnost, že se jedná o železnou rudu.

Tavba byla provedena v rekonstrukci šachtové pace, v jakých se železná ruda zpracovávala už ve středověku. Výzkumem těchto starých pecí se lidé zabývali již před více než 110 lety [8]. Dnes se tomuto tématu věnuje také Technické muzeum v Brně, které shromažďuje záznamy a výsledky z takovýchto experimentálních taveb. Tuto práci bych proto také ráda poskytla jako další příspěvek do jejich sbírky.



(Obr. 1) Rozžhavený materiál strusky a uhlí (L. Tomič, <http://www.curiavitkov.cz>)

2 PROBLEMATIKA ZÍSKÁVÁNÍ ŽELEZA

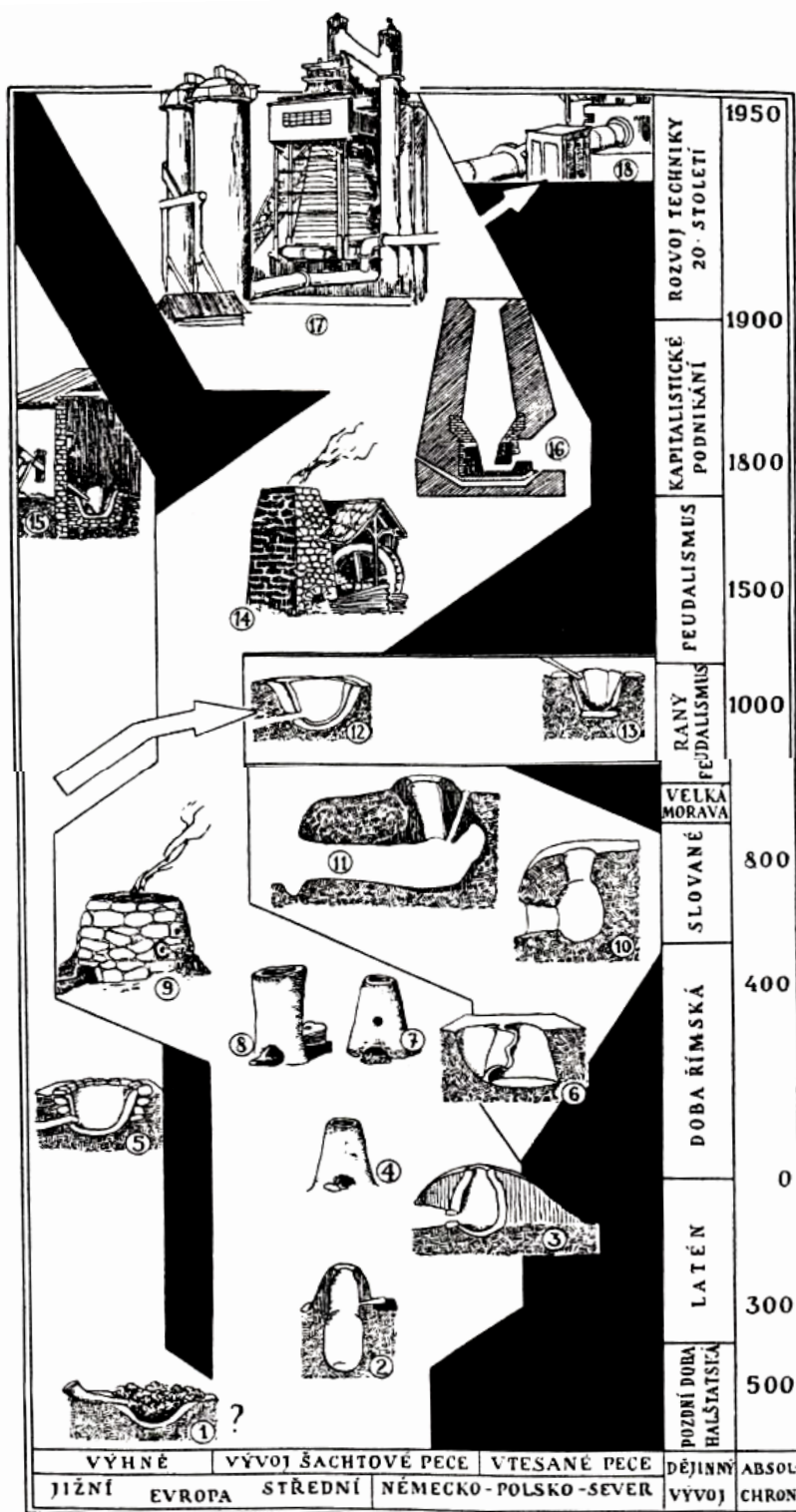
2.1 Historie zpracování železa ve světě

Železo je kov, který významně ovlivnil technický a hospodářský vývoj lidské společnosti. Je tvrdší než bronz a jeho rudy bylo možné získat snadněji. Na druhou stranu zpracování železných rud bylo podstatně náročnější díky poměrně vysoké teplotě tání (1300-1350°C) [7]. Nejstarší nalezené železné předměty jsou datovány do 3. tisíciletí př. n. l. a pocházejí z Egypta a Mezopotámie. O většině z nich předpokládáme, že byly vytvořeny z meteorického železa (vysoký obsah Ni). Poprvé bylo železo z rud vyráběno pravděpodobně v Antónii, dále v Íránu, v Palestině a v Řecku. Vyrábělo se přímo z rud v pecích vytápěných dřevěným uhlím. Vznikala tzv. železná houba neúplně oddělená od strusky s velkým množstvím pórů. Díky malému obsahu uhlíku však bylo takto získané železo dobře kujné. Ve větším množství se železo začalo používat až v 8. Století [1]. Domníváme se, že objev železa byl spojen se získáváním mědi ze sulfidických rud (chalkopyrit - CuFeS_2), při kterém vzniká železo jako odpad. První železářské pece se začaly objevovat už v třetím až druhém tisíciletí př. n. l. v přední Asii [4]. Po příchodu Keltů ve 4. století př. n. l. se železné předměty rozšířili téměř do všech řemesel a nejdůležitějším řemeslem se tak stalo kovářství. Železo se z počátku vyrábělo redukcí oxidických rud, které se získávaly povrchovou těžbou. Ve starověku a středověku vzniklo několik typů pecí - polozahloubené pícky, jámové zahloubené pícky, nebo volně stojící šachtové pece.

2.2 Historie zpracování železa na našem území

I na našem území (poblíž Opavy) byly nalezeny stopy po zpracování železa meteorického původu [7]. Asi v 6. století př. n. l. začíná doba železná v Evropě. Počátky zpracování železa (ne meteorického původu) v Čechách a na Moravě se datují do přelomu 5. a 6. století př. n. l. [1]. Nejpravděpodobněji se k nám znalost zpracování železa dostala z podhůří Alp, kde se nacházela velká ložiska železné rudy [4]. Železářské hutě byly zakládány vždy co nejbližší u zdroje rudy, kterou železáři nejčastěji získávali povrchovou těžbou. Ale nejen blízkost zdroje rudy ovlivňovala polohu hutě. Byl to také blízký zdroj vody a dostatek dřeva pro mířování uhlí. Na území české republiky bylo nalezeno 16 lokalit s nálezy pozůstatků výroby železa (struska, zbytky pecí, železné předměty), z nichž jedenáct se nachází na Moravě. Na základě dnešních výzkumů se domníváme, že nejintenzivnější hutnění u nás tedy probíhalo na Moravě. Pravděpodobně proto, že pro hutnění zde byly velmi dobré přírodní podmínky [2]. Po příchodu slovanských kmenů na naše území železáři pracovali v plně organizovaných hutích, které byly zakládány co nejbližší surovinových zdrojů a zdrojů vody [4].

18. Rotační troubová pec na přímou výrobu železa (Králov Dvůr)
17. Vysoká pec s cowpery
16. Dřevouhelná vysoká pec s otevřenou hrudí (Adamov 1793)
15. Katalánská výheň ve francouzských Pyrenejích, 19. stol.
14. Štýrská kusová pec s vodním pohonem dmychadel
13. Redukční výheň z Kleivseteru (Norsko), doba vikinská až 15. stol.
12. Redukční výheň z Hofu (Westerwald), časný středověk
11. Vtesaná pec s umělým přívodem vzduchu (Želechovice, Morava), hranice 8.-9. stol.
10. Vtesaná pec z Prahy-Košíř
9. Římská šachtová pec s kamenným pláštěm, (Lölling, Noricum)
8. Nadzemní pec jílová z Loděnic u Berouna, doba římská
7. Nadzemní pec jílová s přirozeným přívodem vzduchu (Netřeba, Čáslavsko), doba římská
6. Zahloubená konická pec ze Slánska
5. Římská tavicí výheň z Hüttenbergu (Noricum)
4. Šachtová nadzemní pec s jílovým pláštěm z Prahy-Podbaby (VII), doba římská
3. Vestavěná větrná pec z Vyklí (II), doba laténská
2. Pec se zahloubenou nístějí typu Podbořany, doba laténská
1. Předpokládaná tavicí výheň se struskovým obložením (srov. Králová u Litovle), doba halštatská



(Obr. 2) Historický vývoj pecí na tavbu železné rudy (převzato z R. Pleiner 1958)

2.3 Úprava a tavba rudy ve středověku

Vytěžená ruda byla před samotným tavením upravována za studena, aby obsahovala co nejvíce železa. Oddělovala se hlušina, ruda se drtila na menší kousky, sušila se, probírala a pražila se. Pražením se narušila hmota rudy a ta pak byla snáze tavitelná. Odstranila se její vlhkost a některé nežádoucí složky rudy jako např. síra. Pražení probíhalo na ohni za volného přístupu vzduchu. V pecích na tavbu rudy se topilo dřevěným uhlím, i to mohl být důvod, proč se zakládaly hutě v horách, kde ještě bylo kvalitního dřeva dost. Výběr dřevin pro výrobu dřevěného uhlí závisel na tom, co rostlo v blízkém okolí milíře. V moravském krasu se používalo nejčastěji bukové dřevo. Pece pro konečnou tavbu rudy se stavěly většinou z jílu, který se míchal s pískem. Jíl se nejprve máčel, sekal a hnětl do určité plasticity. Občas se z jílu vyráběly cihly a z těch se následně stavěla pec, nebo byly použity kameny. Jíl vydrží teplotu až 1400°C.[3]

2.4 Chemické reakce při procesu tavby

K získávání surového železa z železných rud se používají dva hlavní způsoby. Jde o přímou a nepřímou redukci.

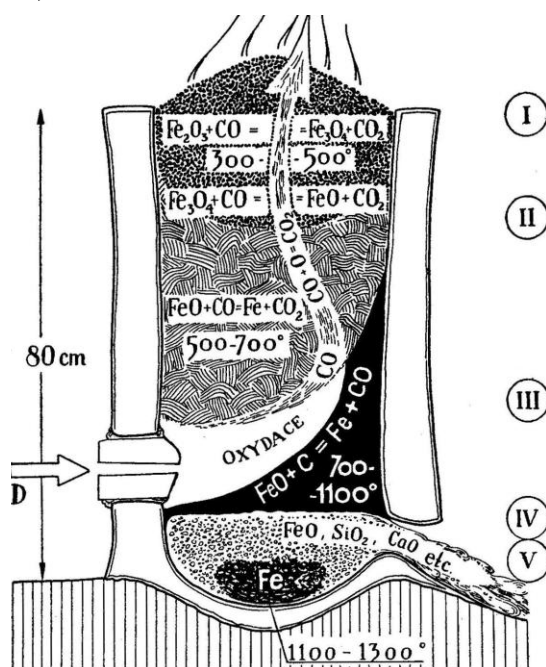
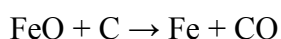
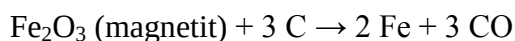
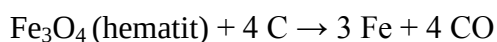
2.4.1 Nepřímá redukce

V dnešní době se železo zpracovává především nepřímou redukcí ve vysokých pecích. Vzniká surové železo v tekutém stavu s vysokým obsahem uhlíku (3-5%). Toto železo je však velmi tvrdé a křehké. Proto se dále zpracovává v tzv. konvertorech za zpětné oxidace uhlíku. Výsledkem je kujné železo nebo ocel.

- a) $\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{hematit}) + \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 (\text{magnetit}) + \text{CO}_2$
- b) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3 \text{FeO} + \text{CO}_2$
- c) $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$

2.4.2 Přímá redukce

Právě přímou redukcí se zpracovávalo železo od doby železné až po vynalezení vysokých pecí (16.-17. st.). Přímou se tato metoda nazývá, proto, že je časově o méně náročná než nepřímá.[4] Při přímé redukcí se železo nezahřívá až do tekutého stavu a pojme menší obsah uhlíku. Po určité době se v peci vytvoří železná houba.



(Obr. 3) Chemické procesy v peci při přímé redukcí (Experimentální tavba železa v Českém lese, 2007)

3 TYPY ŽELEZNÝCH RUD

V této kapitole je podán stručný přehled nejběžnějších železných rud, které byly v historii těženy na dnešním území českého státu. Přehled je sestaven abecedně a vychází nejvíce z informací získaných

Hematit (Fe_2O_3) je tmavě červený, hnědý nebo šedý minerál (Obr. 4, A), který má v přírodě mnoho nalezišť. Obsahuje až 65% železa a je snadno redukovatelný. Častým průvodním minerálem bývá křemen.[4] Na našem území byl nejčastěji těženou rudou železa. Velmi významným místem výskytu hematitu na našem území je například Krkonošsko-Jesenická soustava [9]

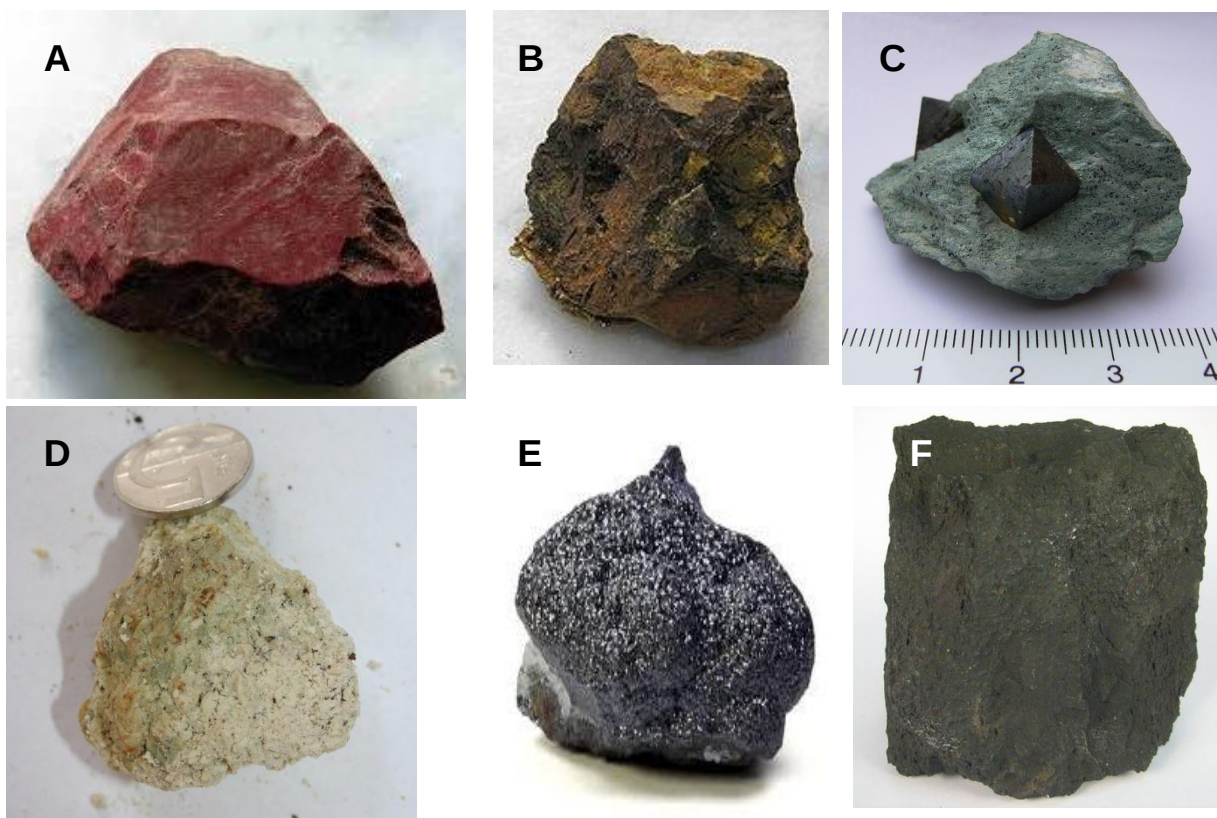
Limonit ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) je zbarvený okrově až tmavě hnědě (Obr. 4, B). Nejedná se o samostatný minerál, ale o směs zejména goethitu a lepidokrokitu v různých poměrech.[9] Tento materiál je velmi snadno redukovatelný. Často vzniká srážením oxidů a hydroxidů železa ve vodě jako tzv. bahenní ruda[4], nebo v povrchově vyvěřelých horninách s obsahem železa v průběhu jejich chemického zvětrávání v oxidačních podmínkách.[9] Limonit obsahuje až 45% železa.[4]

Magnetit (Fe_3O_4) je nejčastěji zbarvený černě s vysokým leskem a s magnetickými vlastnostmi (Obr. 4, C). Obsahuje až 68% železa.[4] Jedná se o minerál typický pro bazické vyvěřelé horniny (například bazalt). Magnetit vzniká také při pražení hematitové rudy, kdy dochází k primární redukci oxidu železitého na oxid železnato-železitý pomocí oxidu uhelnatého.[9]

Siderit (FeCO_3) je žlutohnědý, hnědočervený nebo šedý minerál (Obr. 4, D). Nejčastěji vzniká sedimentárně v mořském prostředí a obsahuje až 40% železa. [4] Může ale vznikat také jako sekundární minerál jiných rudních poloh při jejich zvětrávání za účasti vzdušného CO_2 rozpuštěného v průsakových vodách.

Goethit ($\text{Fe}_3\text{O}(\text{OH})$) je černohnědý, ojediněle žlutohnědý a na vrypu žlutozelený minerál (Obr. 4, E). Je mírně magnetický a je součástí limonitu. Může vznikat oxidací jiných minerálů železa při jejich zvětrávání v polohách, které jsou v kontaktu s průsaky srážkových vod, nebo obecně v oxidačních zónách. Obsahuje až 63% Fe.[9]

Chamosit ($\text{Fe}_2 + \text{Fe}_3 + \text{MgAl})_6 (\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{O},\text{OH})$ obsahuje až 42% Fe[9] a vyskytuje se převážně v železitých sedimentech vzniklých v redukčních podmínkách. Jeho hlavní příměsí bývají siderit, křemen, magnetit a limonit. Charakteristická je pro něj zelená barva, která indikuje přítomnost dvoumocného železa (Obr. 4, F).



(Obr. 4) Hlavní mineralogické typy železných rud: A – hematit (Luis Sánchez, 2005) [9]; B – Limonit (Luis Sánchez, 2005) [9]; C – magnetit (Density, 2005) [11], D – siderit (Ondřej Halama, 2013); E -goethit (<http://www.brotterode-am-inselsberg.eu>); F – chamosit (J. Jirásek, 2006, <http://geologie.vsb.cz>).

4 POUŽITÉ SUROVINY

4.1 Jíl

K přípravě vepřovice a stavbě pece byl použit jíl WBTS drcený zakoupený v závodu Brník u Kostelce nad Černými lesy. Směsný středně plastický žáruvzdorný jíl, vhodný do výrobků se světlým střepek. Obsahuje organické látky od 1,5 do 3% [9]. Před použitím je potřeba jíl nadrtit na menší kusy, ale jinak svými vlastnostmi vyhovuje ke stavbě pece na železnou rudu.

Hodnota	Jíl WBTS		
CHEMICKÁ ANALÝZA		Zbytek na síť 0,063 mm (%)	4 - 12
SiO ₂ (%)	58 - 64	> 63 μm (%)	5,6
Al ₂ O ₃ (%)	32 - 36	63 - 40 μm (%)	2,1
Fe ₂ O ₃ (%)	max. 1,5	40 - 20 μm (%)	6,6
TiO ₂ (%)	1,4	20 - 10 μm (%)	9,1
CaO (%)	0,3	10 - 4 μm (%)	12,6
MgO (%)	0,2	4 - 2 μm (%)	11,2
K ₂ O (%)	0,6	< 2 μm (%)	52,8
Na ₂ O (%)	0,1	Smrštění sušením (%)	4 - 5
Ztráta žíháním (%)	11 - 14	Pevnost v ohybu po vysušení (MPa)	1,3
RACIONÁLNÍ ANALÝZA		Žáruvzdornost (ž)	171
Jílové minerály (%)	70	Organické látky (%)	1,5 - 3
Křemen (%)	20	Obsah karbonátu (%)	max. 0,1
Živec (%)	-	Smrštění celkové 1250°C (%)	11 - 12
ZRNITOSTNÍ ANALÝZA		Nasákavost varem 1250°C (%)	9 - 10
Zbytek na síť 2 mm (%)	stopy	Stupeň plasticity (Gp)	4,2 - 5,2
Zbytek na síť 0,090 mm (%)	3 - 8	Stupeň jemnosti jílovitých minerálů (Ga)	6,7

(Obr. 5) Tabulka vlastností a složení jílu WBTS použitého ke stavbě pece (www.keramost.cz)

4.2 Uhlí

Jako palivo do rekonstrukce pece bylo použito dřevěné grilovací uhlí (Teni – Reuse reduce recycle) pořízené v Hornabchu. Kvalita uhlí byla k tavně, jak se později ukázalo dostačující. Celkově se v průběhu tavy (23h) spálilo cca 35kg dřevěného uhlí.

4.3 Železná ruda

Jako zdroj k získání železa tavením v rekonstrukci pece byla použita železná ruda natěžená na Ralské pahorkatině, jejíž přesné složení a název nám není zcela jasný. Následující podkapitoly stručně představují geologický vývoj zrudnění a jeho bližší charakteristiku. Popisem a dokumentací nalezišť těchto rud se zabývá závěrečná zpráva Báňská díla 2013 (dostupném z: www.prirodniskola.czweb.org)

4.3.1 Geologický vývoj zrudnění

Geologické podloží Ralské pahorkatiny odkud ruda pochází, tvoří horniny České křídové pánve (145 - 65 mil. let), zejména acidní pískovce, slepence svrchního turonu převážně Jizerského souvrství (z menší části i Teplického souvrství), které jsou v návaznosti na tektonické poruchy třetihorního a kvartérního stáří (Alpinské vrásnění) prostoupeny žilami bazických magmatitů horizontální odlučnosti. Magmatity tvoří velice pevnou horninu tmavé barvy, šedé až černé, místy prostoupenou pyroxeny. Tyto bazaltoidy jsou třetihorního stáří z období paleogénu až neogénu. Žíly bazických magmatitů lze v terénu sledovat na vzdálenost až desítek kilometrů (zejména v SV části oblasti). Pronikající magma o teplotě mezi 900 – 1100° pískovce kontaktně metamorfovalo do vzdálenosti max. několika metrů. Na řadě míst tak vznikly zajímavé soubory hornin. Typická je v těsné blízkosti žil přítomnost velmi odolných křemenců. Hojně se vyskytují železité impregnace v různých variacích (od pevných

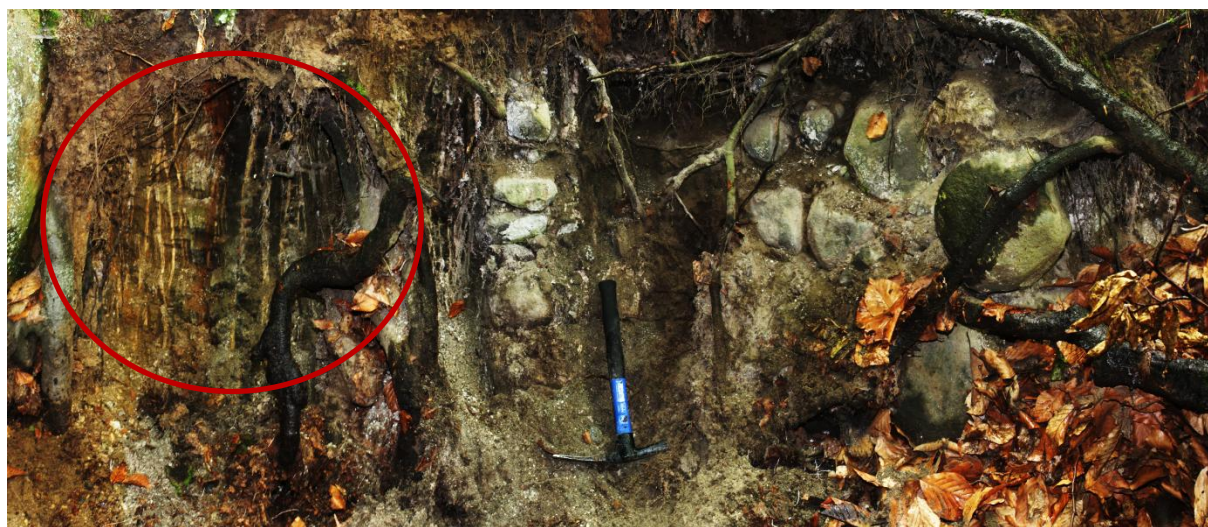
kyzů, které působí dojem kusového železa, přes vrstvy prosycené železitými sloučeninami, které díky větší odolnosti dávají vzniknout skalním pokličkám a převisům až po široce rozptýlené železitě sloučeniny, které zbarvují některé vrstvy pískovců do různých odstínů fialové, červené a oranžové). V prostoru mezi bazaltovou žílou a pískovcem vznikaly později zvětraliny, které jsou bohaté na železo.

4.3.2 Charakter rudy

Železná ruda, vytavená za účelem zjištění jejího obsahu železa, byla natěžena na jihovýchodní části Kozího hřbetu nacházejícím se na Ralské pahorkatině blízko Hamru na Jezeře. Předpoklad, že se v případě tohoto materiálu jedná o železnou rudu, vycházela z jeho vlastností jako je magnetičnost nebo nazelenalá barva ukazující na obsah dvoumocného železa (Obr. 6). Ruda se nacházela v uměle vyhloubené jámě odkrývající celý profil polzenitu (Obr. 7). Polzenitem (je myšlen soubor hornin nacházejících se na místech kde v alpinském vrásnění prostupovalo puklinami v pískovci magma a na kontaktu ho metamorfovalo (viz. kap. 3.3.1). Železo vystupující k povrchu se koncentrovalo na okrajích poruchy a díky tomu ho bylo možné v pozdější době těžit ve formě zvětralých železných rud. Tato zvětralinová část může obsahovat minerál chamosit (viz. kap. 2.5). Místy se objevuje také naoranžovělý materiál, patrně limonit a bílé několik milimetrů až centimetrů tlusté žilky, patrně sideritu.



(Obr. 6) Detail kusu taveného materiálu



(Obr. 7) Polzenit na Kozím Hřbetě s vyznačením vrstvy jílovité rudy prostoupené žilkami bílého minerálu, pravděpodobně sideritu (foto: Marek Matura, 2013).

5 STAVBA PECE

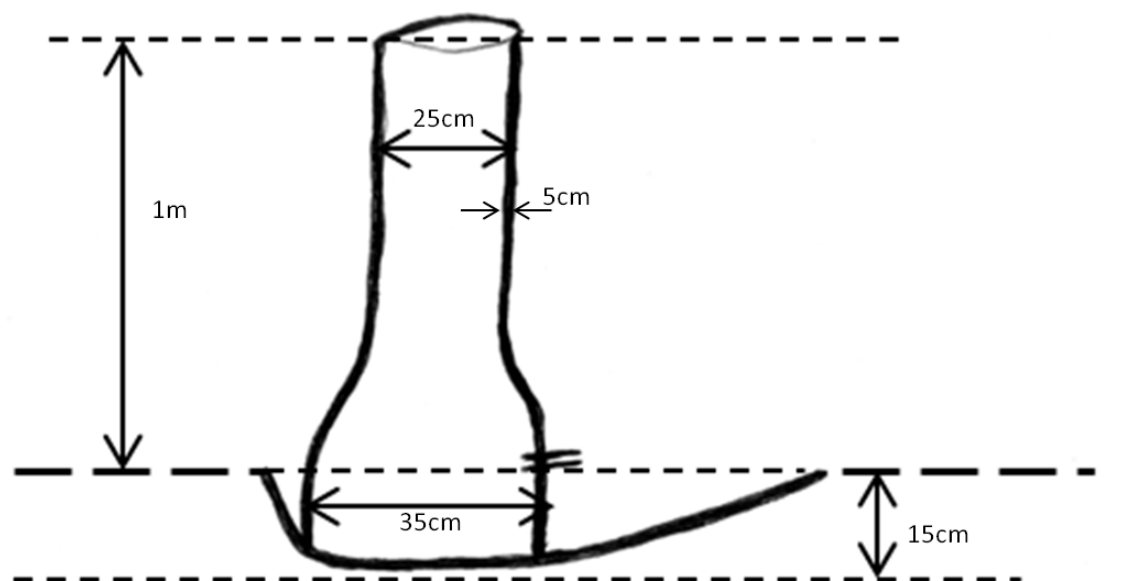
Následující kapitola podrobně popisuje postup při stavbě rekonstrukce středověké pece a následný průběh tavby.

5.1 Přípravné práce

Prvním úkolem bylo vybrání vhodného místa k postavení peci a to v dostatečné vzdálenosti od předmětů, u kterých by hrozilo vznícení v průběhu tavby a zároveň v dostatečné blízkosti zdroje vody a elektřiny.

Na vybraném místě byla vykopaná jáma. V místě budoucí nístěje (prostor pece pod dyšnou) byla 15 cm hluboká (Obr. 8). Následně bylo potřeba vytvořit tzv. opěrný sloup (viz. Příloha č. 1. Obr. 3), který bude později držet tvar pece, dokud dostatečně neztvrdne a nebude schopna stát sama bez opory. Z lísky bylo nařezáno velké množství prutů o průměru 1-4cm. Pruty byly nařezány na délku 1,5m a rozestavěny do pravidelného kruhu okolo kůlu o šířce 10cm. Celý sloup byl pevně svázan. Následně byl obložen slámou a celý zabalen do igelitových pytlů. Sláma se používá pro vyplnění nerovností prutů a k lepšímu vytvoření pravidelného kruhu. Hotový sloup byl podepřen třemi prkny, aby dokázal samostatně stát. Jeho poloměr v úrovni vrcholu budoucí pece byl 12,5cm a vznikl tak obvod 78,5cm. Sloup se směrem dolů rozšiřoval až na obvod cca 110cm.

Z jílu typu WBTS, slámy a vody byla vytvořena stavební hmota (viz. Příloha č. 1. Obr. 2), směs surovin užívaná ke stavbě pecí ve středověku, která je podobná materiálu pro výrobu vepřovic. Na jedno kolečko jílu byl použit přibližně jeden kyblík nasekané a dopředu namočené slámy. Voda byla přidána tak, aby byla směs dobře tvárná a přitom ne příliš tekutá. Zakoupený jíl byl drcený a obsahoval větší kusy, které by se při smíchání s vodou špatně rozpouštěly. Z tohoto důvodu bylo potřeba ho nejprve prosít a oddělit větší kusy, které se následně drtily na prach. Všechny suroviny byly promíseny šlapáním v kádi. Ze vzniklé hmoty byla následně uplácána celá pec.



(Obr. 8) Rozměry pece

5.2 Stavba pece

Jako první byla jílem vymazána vykopaná díra. Vrstva jílu byla přibližně 5cm tlustá. Po zaschnutí jílu (cca 24h) do vykopané díry byl na místo nístěje umístěn připravený sloup a postupně byl oplácáván směsí jílu a slámy. Při stavbě bylo potřeba postupovat pomalu a nenanášet na opěrný sloup příliš silnou ani vysokou vrstvu materiálu aby se spodek pece nedeformoval (viz. Příloha č. 1. Obr. 4). Výsledná šířka stěn pece se ve výsledku pohybovala okolo 5cm. Stavba celého komínu trvala přibližně dva dny.

Komín další čtyři dny vysychal a pátý den bylo možné postupně vytahat jednotlivé pruty opěrného sloupu a pec nechat stát samostatně (viz. Příloha č. 1 obr. 6). Komín bylo potřeba následně vymazat jílem (předpokládám), aby se při tavně struska zbytečně nepřichytávala ke stěnám (viz příloha č. 1. Obr. 8). Pec byla zároveň dotvarována v horní části a byl upraven vnější plášť. Při těchto úpravách vznikl problém s praskáním později nanášeného jílu (viz. Příloha č. 1. Obr. 9). Praskání se dalo zmírnit navlhčením už vyschlého jílu komínu. Ve výsledku se praskání nepodařilo zcela zabránit, ale při tavně tyto vady nijak nepřekážely.

Po dokončení výše popsaných drobnějších úprav byly do přední stěny pece vyříznuty 15 cm od dna dvířka ve tvaru polokruhu (viz. Přílohy č. 1. Obr. 7). Protože byl jíl po pěti dnech poměrně dobře zatvrdlý, bylo potřeba použít kuchyňský nůž a kladivo. Dvířka se směrem zevnitř ven rozšiřovala. Do samotných dvířek byl vyřezán kruhový otvor, do nějž byla umístěna cca 25cm dlouhá žáruvzdorná keramická trubka pro přívod vzduchu. K trubce byla izolepou přidělána druhá trubka ze železa přivádějící vzduch vháněný pomocí chladiče ze škodovky a nabíječky autobaterií (viz. Příloha č. 2. Obr. 1)

6 PRŮBĚH TAVBY

6.1 Tavba

Po dvou týdnech od započetí prací byla pec dostatečně vysušena a připravena k tavně. Před samotnou tavnou se v peci zatopilo nejprve dřevem. Když se oheň dostatečně rozhořel, byly do připraveného otvoru vloženy a jílem zamazány dvířka s přívodem vzduchu (viz. Příloha č. 1 obr. 10). Následně (po cca hodině) se do pece začalo přikládat také dřevěné uhlí, až byla zaplněna až po okraj (15:41). Uhlí hořelo oranžovo modrým plamenem. Jakmile začala převažovat modrá barva plamene (viz. Příloha č. 2. Obr. 4), znamenalo to, že začaly hořet kychtové plyny a byla naložena první vsázka železné rudy - dvě lopatky uhlí (cca 100g) a jedna lopatka rudy (cca 350g). Vsazovalo se přibližně třikrát za hodinu. Tavnba takto probíhala bez problému, až do 01:35 kdy pec přestala hořet. Uhlí stále klesalo, ale nahoře nebyl pozorovatelný žádný plamen. Vsazování probíhalo stále stejným tempem okolo tří vsázek za hodinu. Od 05:00 do 06:00 se přestalo vsazovat a pec se nechala vyhořívat. Uhlí dost sklesalo a v šest se znovu rozhořely kychtové plyny. Po prošťouchnutí pece shora hořící kychtové plyny zhasly a chytly až za dvě hodiny v 07:55. Množství vsázek z hodinu se ustálilo na třech až do 14:52, kdy byla vsazena poslední lopatka rudy, přívod vzduchu odpojen a pec ze shora přikryta plechem (viz. Přílohy č. 2. Obr. 5). Ještě přibližně hodinu zpod plechu šlehalý modré plameny a dále už pec jen chladla.

6.2 Konečná fáze vyjmutí vytaveného materiálu

Asi po dvanácti hodinách po vsazení poslední lopatky byl sundán plechový kryt a shora vybráno nevyhořelé uhlí. Potom byla vyndána dvířka. V místě nístěje úplně na spodu pece bylo přibližně 10cm vysoká vrstva nevyhořelého uhlí s kusy železné rudy. Na této vrstvě by v konečném důsledku měla správně ležet železná houba. V našem případě se jednalo o tvrdší a těžší strusku, v níž se nacházeli maximálně 0,5cm velké kuličky čistého kujného železa. Tento útvar byl ze spodu přichycen na částečně roztavené trubce, která do pece přiváděla vzduch. Dalších asi 5cm byl volný prostor a nad ním se klenul strop, tvořený struskou přichycenou na stěnách pece (viz. Přílohy č. 3. Obr. 1). Šlo o přibližně 5cm tlustý „koláč“ strusky, který se vytvořil nad dyšnou (místo přívodu vzduchu) a zabraňoval přívodu vzduchu a sklesávání rudy níže. Nad tímto struskovitým útvarem byl ještě jeden „koláč“ podobné mocnosti.



(Obr. 9) Materiál v peci po ukončení tavy

7 VÝSLEDKY A ZÁVĚR

7.1 Vytavený materiál

Z materiálu, který byl natěžen na Kozím hřbetě bylo vytaveno malé množství surového železa. Jde o přibližně půl centimetru veliké kuličky železa různě rozmístěných ve strusce pod dyšnou. V peci vznikly tři hlavní útvary přetaveného materiálu. Přibližně uprostřed pece bylo na stěně přichycen koláčovitý útvar strusky. Tento materiál byl ale velmi lehký, obsahoval kusy nepřetavené rudy a surové železo v něm nebylo nalezeno. Přibližně 5cm pod tímto útvarem se nacházel podobný, také velmi lehký a bez obsahu železa. Mocnost obou strusek byla okolo 7cm a poloměr byl stejný jako poloměr pece (viz. Přílohy č. 3. Obr. 1). Je pravděpodobné, že spodní patro strusky zabraňovalo přístupu vzduch ke druhému a díky tomu nebyla vytvořena dostatečná teplota pro přetavení větších kusů rudy.

Nejzajímavější část vytaveného materiálu se nacházela, jak už bylo zmíněno přímo pod dyšnou, nalepená na z části roztavené trubce (viz. Přílohy č. 3. Obr. 2). Útvar byl asi 12x12cm velký a jeho hustota byla o mnoho vyšší, než u předchozích dvou útvarů. Zároveň byla struska velmi pevná a jen těžko šla rozbít. Uvnitř tohoto útvaru byly nerovnoměrně uspořádané kuličky železa (viz. Přílohy č. 3. Obr. 5). Ty se od strusky poznaly tak, že byly velmi magnetické a po vybroušení jemným pilníkem kovově lesklé (viz. Přílohy č. 3. Obr. 3, 6 a 7). To, že bylo možné materiál brousit pilníkem na železo, také ukazuje na nepřítomnost silikátů, které by pravděpodobně broušení odolávaly.

I přes to, že z několika kil materiálu z Kozího hřbetu vzniklo jeho redukci v peci jen nepatrné množství železa, lze usuzovat, že se opravdu jedná o železnou rudu. Je tedy pravděpodobné, že ve starých dobývkách na Ralské pahorkatině se těžil právě tento materiál, kterým námi byl na základě svých vlastností určen jako chamosit.

7.2 Možné negativní vlivy na výsledek tavby

Na nepříznivý výsledek tavby mohlo mít vliv kromě malého obsahu železa v rudě mnoho dalších faktorů. Jedním z nich mohlo být příliš velké nebo naopak příliš malé množství vháněného vzduchu. Pokud je vzduch příliš, ochlazuje se prostředí v peci a nelze pak dosáhnout požadované teploty (1400°C) a také se ruší redukční charakter hoření. Naopak pokud je vzduchu málo, uhlí přestává zcela hořet a dochází ke stejnému efektu, a to že teplota v peci je nedostačující.

Další věcí ovlivňující výsledek tavby je tvar a především hloubka nístěje pece. Pokud je nístěj příliš hluboká, není sem možný dostatečný přísun vzduchu skrz ostatní materiál a v zadní části zůstává nevyhořelé palivo s celými kusy taveného materiálu. Tento jev byl pozorován při této pokusné tavbě. Po vyjmutí dvířek bylo pod a za struskovitou houbou obsahující železo nevyhořelé uhlí a kousky rudy.

Problémem byly také velké kusy strusky nalepené na stěnách pece zabraňující přístupu vzduch do některých vyšších částí pece. Je možné, že struska se na stěnu nalepila, protože její povrch se nepodařilo pořádně vymazat a byl tak velmi hrubý.

Ruda také nebyla před tavením upražděna na otevřeném ohni za přístupu většího množství kyslíku, její struktura proto zůstala pevná a železo ve formě, která se nesnadno redukuje. Na druhou stranu vypražit materiál z Kozího hřbetu by bylo velmi obtížné

vzhledem k tomu, že se jednalo spíše o nadrcený materiál, který by se nesnadno odděloval od popele.

8 POUŽITÁ LITERATURA

[1] *Kovy a slitiny*. Brno: Moravské zemské muzeum, 1992.

[2] Hutnictví železa v 18.-11. st. Na západní Moravě

[3] V. SOUCHOPOVÁ. *Počátky západoslovanského hutnictví železa ve světle pramenů z Moravy*. Brno: Archeologický ústav AV ČR Brno, 1995. ISBN 80-239-0458-0.

[4] KMOŠEK, Jiří Kmošek. *REKONSTRUKCE PRAVĚKÉHO HUTNICTVÍ ŽELEZA*. Turnov, 2008. Středoškolská odborná činnost. SUPŠ a VOŠ Turnov. Vedoucí práce PhDr. Jiří Merta.

[5] R. PLEINER. *Iron in archeology*. Praha: Archeologický ústav AV ČR Praha, 2006. ISBN 80-86124-62-2.

[6] V. SOUCHOPOVÁ. *Cesta železa Moravským krasem*. Brno: Technické muzeum v Brně, 2002. ISBN 80-239-0459-0.

Online zdroje

[7] http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html#historie

[8] http://www.phil.muni.cz/archeo/webmaster%20peppe/stara_mura/morarch/Vyzkumy/experiment/experiment.html

[9] <http://cs.wikipedia.org/>

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA Č. 1. Stavba komínu pece



(Obr. 1) Jíl, vepřovice a namočené seno



(Obr. 2) Šlapání vepřovice



(Obr. 3) Podpěrný sloup z lískových prutů



(Obr. 4) Stavba komínu pece



(Obr. 5) Vysychání komínu pece



(Obr. 6) Pec po vytažení opěrného sloupu



(Obr. 7) Dvířka pece



(Obr. 8) Postupné zamazání nerovností



(Obr. 9) Problém s praskáním později vymazaných částí



(Obr. 10) Zamazání dvířek s přívodem vzduchu

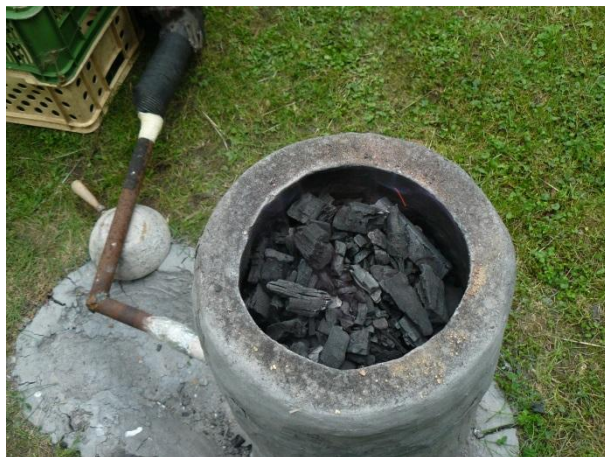
PŘÍLOHA Č. 2. Tavba železné rudy



(Obr. 1) Umělý přívod vzduchu do pece (nabíječka autobaterií a chladič z auta)



(Obr. 2) Praskání dvířek po vysušení



(Obr. 3) Naplnění pece dřevěným uhlím



(Obr. 4) Hoření kychtových plynů



(Obr. 5) Zakrytí pece po dokončení vsazování rudy a uhlí

PŘÍLOHA Č. 3. Vytavený materiál



(Obr. 1) Koláčovitý útvar strusky nalepený na stěně pece



(Obr. 2) Tvrdá struska obsahující kousky železa (pod dyšnou)



(Obr. 3) Vybroušené železné části



(Obr. 4) Zajímavé materiály krystalizující ve strusce



(Obr. 5) Viditelné železné kuličky



(Obr. 6) Magnetické železné kuličky



(Obr. 7) Vyseparované železné kuličky