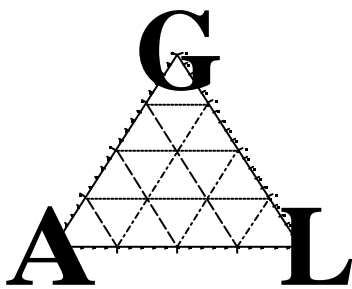


GEOARKEOLOGI

**Spadformade ämnesjärn från Torsåker  
Inledande arkeometallurgiska analyser**

Kråknäset  
Torsåkers sn  
Gästrikland



**Geoarkeologiskt Laboratorium**

Analysrapport nummer 16-2000

**Riksantikvarieämbetet**

Avdelningen för arkeologiska undersökningar  
UV GAL

*Lena Grandin*

# Innehållsförteckning

<b>INLEDNING.....</b>	<b>2</b>
<b>MÅL.....</b>	<b>2</b>
<b>METODER.....</b>	<b>2</b>
<b>RESULTAT .....</b>	<b>3</b>
REGISTRERING.....	3
ANALYSER.....	3
<b>SAMMANFATTNING, TOLKNING OCH DISKUSSION.....</b>	<b>6</b>
<b>MATERIALETS OCH OMRÅDETS MÖJLIGHETER.....</b>	<b>7</b>
<b>REFERENSER.....</b>	<b>8</b>
<b>TABELLER .....</b>	<b>9</b>
<b>BILAGOR.....</b>	<b>10</b>
TERMINOLOGI .....	10
ALLMÄNT OM ANALYSER AV ARKEOMETALLURGISKA MATERIAL.....	11

## Inledning

På uppdrag av Lars Holmgren, Torsåkers kulturhistoriska sällskap, har Geoarkeologiskt laboratorium (GAL) utfört metallografiska analyser av två spadformade ämnesjärn, ett råjärn och två "luppar" från Fastigheten Fors 27:3, Kråknäset, Torsåkers socken Gästrikland. Ansvarig för rapporten är Lena Grandin.

## Mål

Syftet med undersökningen är att utröna ämnesjärnens respektive "lupparnas" kvaliteter. Har ämnesjärnen sinsemellan likartad kvalitet? Är denna i sin tur överensstämmande med den i "lupparna" eller kan skillnader påvisas. Den senare frågan är viktig för att om möjligt kunna knyta ämnesjärnen till "lupparna". Kvalitetsbedömningen innebär dels frågan om bättre eller sämre kvalitet (t ex mängden innesluten slagg), dels vilken typ av kvalitet och därmed de egenskaper som materialet har.

## Metoder

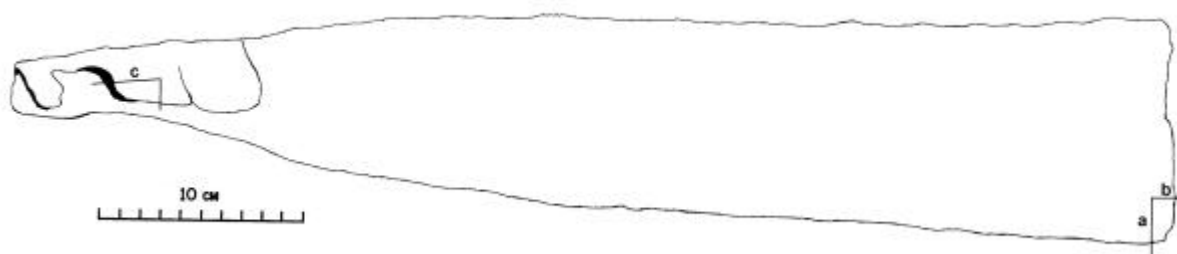
I denna undersökning används två typer av analyser, metallografiska och elektronmikrosondanalyser. Metallografiska analyser används på utvalda delar av ämnesjärnen och "lupparna" vilka prepareras för analyser. De tillverkade polerproven studeras under mikroskop där järnets olika texturer, beroende på kemisk sammansättning och bearbetningssätt, i prover som etsats med 2% nitallösning, framträder. Metoden är användbar för att bedöma kolhalten i materialet, t ex om det är ett mjukt järn eller ett kolstål samt hur detta har bearbetats. Det är också möjligt att avslöja ett fosforinnehåll, vilket också påverkar materialets hårdhets- och seghetsegenskaper. Även mängden och typen av slaggineslutningar kan studeras för att ytterligare kunna bedöma styckets kvalitet och ändamål. De metallografiska undersökningarna genomförs i ett Leitz Ortholux II polarisationsmikroskop utrustat med en Leitz Orthomat mikroskopkamera.

Elektronmikrosondanalyser används på metallografiskt analyserade stycken för att få en mer detaljerad bild över deras kemiska sammansättning. Metoden innebär att en elektronstråle fokuseras på önskad punkt. Den reflekterade röntgenstrålningen relateras till ett referensprov med känd sammansättning. På detta sätt får man kvantitativa data över sammansättningen av de olika komponenterna, t ex ett fosforinnehåll, i materialet. Kol kan dock inte analyseras direkt med elektronmikrosonden men ett eventuellt kolinnehåll framgår indirekt av resultaten i form av en relativt lägre järnhalt. Elektronmikrosondanalyserna kan vidare avslöja andra "kemiska fingeravtryck", dvs ämnen som förekommer antingen i metallen eller eventuella slaggineslutningar kan vara karaktäristiska för en viss region och kan användas för att spåra järnets väg från råvara till ämnesjärn. Områden ned till 2µm i storlek kan analyseras. Elektronmikrosondanalyserna genomförs med Cameca-instrumentet vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. I denna undersökning har ett prov analyserats.

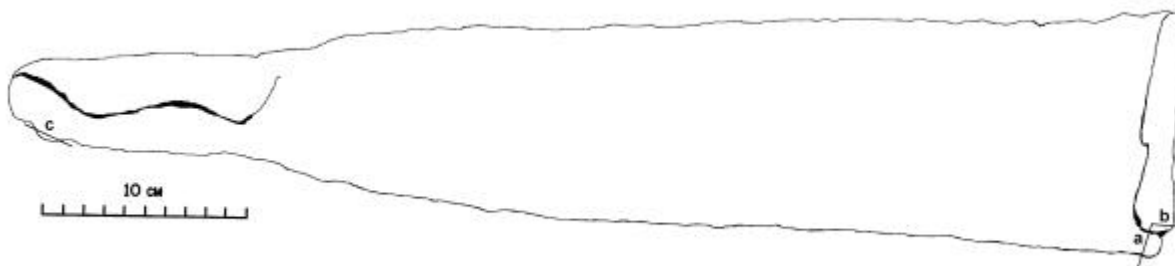
# Resultat

## Registrering

Materialet består av två spadformade ämnesjärn, ett råämne av järn och två ”luppar”. Ämnesjärnen är i det närmaste lika stora, 55 cm långa. Det något mindre (prov 1) är 11 cm brett som bredast, det något större (prov 2) är 12 cm brett vid basen. Prov 1 väger 941 g (efter provtagning för  $^{14}\text{C}$ -datering), prov 2 1055 g. Båda ämnesjärnen provtas vid den omböjda basen (A parallellt med basen och B vinkelrätt mot basen) samt vid den omböjda holken (C). Råämnet är något oregelbundet rektangulärt, ca 13 cm långt, 7–7,5 cm brett och 3–3,5 cm tjockt. Det väger 1440 g. Ett tvärsnitt i ena kortändan är utvalt som prov (prov 3). ”Lupparna” väger ca 35 respektive 25 kg. Båda är oregelbundet avlånga i formen med något skålformad undersida. Av den mindre ”luppen” har ett stycke utvalts som prov från ett centralt område nära dess yterkant såväl i ett längd- som tvärsnitt (prov 4).



Prov 1.



Prov 2.

## Analyser

### Prov 1

I snitt *1a* är järnet relativt tätt. Endast få och små slagginneslutningar förekommer. Dessa är långsträckta parallellt med ämnesjärnets bas och innehåller en glasfas och/eller wüstit. Snittytan uppvisar en något oregelbundet bandad järnstruktur varierande från ferrit över ferrit och perlit (som är den dominerande) till nära eutektoidisk kolhalt med i princip enbart perlit i begränsade områden. Elektronmikroskopsanalyser (tre stycken) visar att järnet är mycket rent (Tabell 2), dvs det innehåller inga andra ämnen i halter över detektionsgränserna (ca 0,1

viktsprocent) för metoden. En slagginneslutning har också analyserats. Denna är kiselrik men innehåller också järn och aluminium, samt flera ämnen i lägre halter (Tabell 1).

I snitt *1b*, som omfattar vikningen av ämnesjärnet, framkommer en bandad struktur med två sammansättningar. Det yttre bandet är huvudsakligen perlit, dvs nära eutektoidisk kolhalt, och det inre bandet har betydligt lägre kolhalt, huvudsakligen ferrit men lokalt med något perlit. Ett fåtal slagginneslutningar kan observeras. Flertalet är koncentrerade till den lågkolhaltiga delen och följer den omböjda strukturen. Elektronmikrosondsanalyser (tre stycken) visar att järnet är mycket rent (Tabell 2). En av analyserna uppvisar dock spår av fosfor (0,15 viktsprocent).

Också i snitt *1c* framträder ett relativt tätt järn med få koncentrationer av slagginneslutningar vilka huvudsakligen är utsträckta parallellt med snittets och ämnesjärnets längdriktning. Inneslutningarna består av en glasfas och/eller wüstit. Järnstrukturen är bandad parallellt med längdriktningen. Ett centralt band som dominerar och innehåller de flesta slagginneslutningarna består av ferritiskt till lågkolhaltigt järn med en kontinuerlig övergång mot högre kolhalter utåt i provet. Betydligt tunnare band av huvudsakligen perlit omger det centrala bandet. Allra ytterst återkommer ett mycket tunt band av lågkolhaltigt järn. Elektronmikrosondsanalyser (två stycken) visar att järnet är mycket rent (Tabell 2), dvs det innehåller inga andra ämnen i halter över detektionsgränserna (ca 0,1 viktsprocent) för metoden. En slagginneslutning har också analyserats. Denna är liksom den i *1a* kiselrik, innehåller aluminium i liknande halter men mindre järn och mer kalcium än *1a* (Tabell 1).

*Kommentar:* Ämnesjärnet har en något oregelbunden bandning/skiktning. Det varierar i kolhalt från nära kolfritt till eutektoidiskt. Kolhalten är alltså endast i delar av materialet tillräckligt hög för att vara hårdbart. Elektronmikrosondanalyser har vidare visat att järnet är rent för övrigt, möjligen kan fosfor förekomma i låga halter. Slaggmängden är inte anmärkningsvärt hög. Analyserade inneslutningar är rika på kisel och innehåller för övrigt flera ämnen, bland annat aluminium, järn och kalcium, vilket är vanligt för inneslutningar av detta slag. Slagginneslutningarna är inte heller koncentrerade till välfogar. Såväl slagginneslutningar som järnets textur uppvisar tecken på bearbetning. Från de begränsade områden som studerats har det inte varit möjligt att avgöra på vilket sätt ämnesjärnet vällts ihop – om det handlar om flera ursprungsmaterial med varierande kolhalt eller om variationer inom samma råvara, vilket är troligt.

## Prov 2

I snitt *2a* kan en del koncentrationer av slagginneslutningar, varav vissa relativt stora, observeras. En del av dem följer en vikning av ämnesjärnet längs med dess långsida, vilken inte har kunnat noteras med blotta ögat. Slagginneslutningarna består huvudsakligen av glas och/eller wüstit men i några av de större kan också olivinkristaller observeras. Järnets struktur i snittet är något växlande. Den dominerande texturen är ferrit i ena halvan, med en kontinuerlig övergång till lågkolhaltigt material, huvudsakligen kolhalter under hårdbara halter, i den andra halvan. Lokalt förekommer dock områden med nära eutektoidisk kolhalt. Texturen i det lågkolhaltiga området är något deformerad.

I snitt *2b* kan den vikning av kortänden som ses med blotta ögat också tydligt noteras med hjälp av omböjningsstruktur med slagginneslutningar och en bandad järnstruktur. Slagginneslutningarna består av huvudsakligen wüstit med mindre mängder silikatrikt glas. Det dominerande centrala bandet är ferrit. Mot ytterkanten finns en tämligen skarp övergång till en

struktur med eutektoidisk kolhalt i ett mycket tunt skikt. I ett mycket begränsat område uppvisar snittytan en textur som antyder en fosforhalt i cementiten samt förekomst av järnfosfid.

I snitt 2c är järnet tätare än i de två andra studerade snitten från ämnesjärnet. De slagginneslutningar som ändå förekommer består av glas och är långsträckta parallellt med snittytans längdriktning som i det närmaste sammanfaller med ämnesjärnets långsida. Järnet varierar något med huvudsakligen lågkolhaltigt järn i de centrala delarna (ej härdbara halter) och kontinuerligt ökande kolhalter mot ytterkanterna till ca 0,5 % kol. Strukturen är dock mindre tydligt bandad än i de andra två studerade snitten.

*Kommentar:* Ämnesjärnet uppvisar en något oregelbunden bandning/skiktning. Det varierar i kolhalt från kolfritt över låga, ej härdbara kolhalter, till lokalt eutektoidiskt. Kolhalten är alltså endast i delar av materialet tillräckligt hög för att vara härdbart. Slaggmängden är något högre än i prov 1. Slagginneslutningarna är inte koncentrerade till vällfogar. Såväl slagginneslutningar som järnets textur uppvisar tecken på bearbetning. Från de begränsade ytor som studerats har det inte varit möjligt att avgöra på vilket sätt ämnesjärnet vällts ihop – om det handlar om flera ursprungsmaterial med varierande kolhalt eller om det handlar om variationer inom samma råvara.

### **Prov 3**

Tvårsnittet uppvisar en något heterogen struktur. Stycket har genomgående en hög kolhalt. Längs ena kortsidan förekommer ett område bestående av en blandning av vitt och grått gjutjärn. Andelen grått gjutjärn ökar bort från kanten med successivt fler och större grafitnålar till att vara övervägande grafit.

*Kommentar:* Järnstycket är av gjutjärns kvalitet, vilket innebär att det inte är smidbart. Det är sannolikt en del av ett ”tackjärn” som måste färskas för att kunna användas vidare.

### **Prov 4**

Proven utgör en begränsad del från centrala delar i ”luppen” yttersida. Järnet är något otätt. Huvudsakligen är det något poröst men vad som förefaller vara korrosionsprodukter förekommer också, dock inga säkra slagginneslutningar. Järnstrukturen är grovkornig med lokalt väl utvecklade kornkontakter. Längs många av kornkontakterna har perlitnoder bildats. Den begränsade del av ”luppen” som har studerats visar att järnet är kolhaltigt, i stora delar förekommer kol i härdbara halter.

*Kommentar:* Stycket är av bra kvalitet vad gäller avsaknaden av slagginneslutningar. Kolhalten är mestadels härdbar, men varierar något, i de delar som studerats i mikroskop. Analyser av större prov rekommenderas för att få en bättre överblick av styckets homogenitet och användningsområde.

## Sammanfattning, tolkning och diskussion

De spadformade ämnesjärnen uppvisar snarlika resultat. Båda har en något oregelbundet bandad struktur med varierande kolhalter, huvudsakligen lägre i kärnan och högre i ytterkanten. Sannolikt har stycket vikts upprepade gånger vilket framkommer dels av järnets upprepade bandade strukturer, dels slaggineslutningarnas struktur och placering. I båda ämnesjärnen innehåller slaggineslutningarna wüstit och/eller glas. Koncentrationen av slagg är dock något högre i prov 2 än i prov 1. Ytterligare en skillnad kan noteras mellan de båda proven nämligen den att kolhalten, även om den varierar i båda, totalt är högre i prov 1, med lågkolhaltigt järn som dominerande fas, än i prov 2 där i det närmaste ren ferrit dominerar.

De båda spadformade ämnesjärnens struktur och varierande kolinnehåll och därmed hårdhet, uppvisar stora likheter med de metallografiska resultat som presenterats av Hansson och Modin (1973) för ett ämnesjärn från Högs socken i Hälsingland. Elektronmikrosondanalyser har vidare visat att järnet (ett av ämnesjärnen) är relativt rent för övrigt, bland annat saknas kobolt och nickel som tidigare har dokumenterats för andra spadformade ämnesjärn (Thålin 1973). De två studerade ämnesjärnen i denna undersökning avviker från såväl ämnesjärnet från Hög som från många andra vad gäller storleken. Thålin (1973) har gjort en indelning av spadformade ämnesjärn med avseende på längd. Bland dittills kända ämnesjärn var flertalet 28-32 respektive ca 40 cm långa. Endast ett fåtal var längre, ca 60 cm. Hallinder (1978) har vidare gjort en detaljerad genomgång vad gäller längd-, vikt- och geografisk fördelning av ämnesjärn som ytterligare visar dominansen av betydligt kortare fynd än de två 55 cm långa i denna studie. Tidigare dokumenterade fynd från Gästrikland tillhör dock de längre (32-42 cm). De allra längsta presenterade av Thålin (1973) är uppländska och kända endast i två fall. Det ena från Villsberga, det andra från Valsgårde.

De spadformade ämnesjärnen har en avsmalnande ände, en strutformad öppen holk, vars form finns i några variationer (Tholander 1971, Thålin 1973). Tholander (1971) har diskuterat ämnesjärnens tillverkning och eventuella användning. En av kommentarerna gäller formen på "holkarna" som han ansåg var till för att kunna hålla i ämnena då dessa bearbetades vidare till slutprodukten, vilken Tholander (1971) föreslår är en kittel. De analyserade ämnesjärnen i denna undersökning har en holk som är tämligen öppen.

Det studerade råämnet är av gjutjärns kvalitet, som inte har färskats (avkolats) och har med all sannolikhet ett helt annat ursprung än de analyserade spadformade ämnesjärnen och kan därmed inte förknippas med dessa. Ämnesjärnen är troligen framställda av ett framställt järn med ursprungligen betydligt lägre kolhalt (dvs ej färskat).

"Lupparna" som studerats är något porösa men i det närmaste slaggfria. De förefaller ha uppnått tämligen höga temperaturer. Sannolikt har de inte bearbetats vidare även om detta inte kan uteslutas. Den analyserade "luppen" är kolhaltig. Kolhalterna varierar något men förefaller förekomma i mestadels hårdbara halter ("stål"). Kolhalterna är alltså genomgående något högre än i ämnesjärnen och kan med utgångspunkt i detta inte direkt relateras till dessa. Å andra sidan är det i detta skede inte heller möjligt att fastslå att denna typ av "lupp" inte utgjort råvaran till de spadformade ämnesjärnen. Den yttre formen hos "lupparna" är utmärkande och måste undersökas ytterligare, bland annat för att få klarhet i hur bildningsprocessen förlöpt. Inom ramen för denna undersökning har det dock inte varit möjligt att noggrannare utreda detta. Vad vi i nuläget kan se är att "lupparna" är av god kvalitet och att framställningsprocessen bör ha varit mycket effektiv.

## **Materialets och områdets möjligheter**

De två spadformade ämnesjärn som studerats i denna undersökning utgör endast en liten del av ett betydligt mer omfattande fyndmaterial, dvs de tolv stycken spadformade ämnesjärn som påträffades tillsammans. De är överlag lika vad gäller storlek, vikt och form även om smärre avvikelser förekommer. Att notera är deras ansevärd längd (ca 55 cm) vilket är betydligt mer än flertalet av de spadformade ämnesjärn som nämns t ex av Hallinder (1978) vid hans vikt- och längdjämförelse av en stor mängd ämnesjärn. Fynden från Torsåker är också längre än flertalet av de som beskrivs av Thålin (1973) som också gjort en gruppindelning av ämnesjärnstypen baserad på längd. De två ämnesjärn som presenteras av Thålin med storlek jämförbar med den för fynden från Torsåker är båda funna i Uppland – i Villsberga och Valsgårde.

De båda analyserade ämnesjärnen är kolfritt till lågkolhaltigt järn, fläckvis något högre kolhalter. Detta liknar de resultat som tidigare presenterats av Hansson och Modin (1973) för ett spadformat ämnesjärn från Hälsingland.

Ett råämne, ett lösfynd från området, är av gjutjärns kvalitet som inte har färskats (avkolats) och har med all sannolikhet ett helt annat ursprung än de analyserade spadformade ämnesjärnen och kan därmed inte förknippas med dessa.

”Lupparna” är av god kvalitet med tanke på den ringa mängden slagginneslutningar. Järnet är kolhaltigt med kolhalter i huvudsakligen hårdbara halter, dvs genomgående högre än i de spadformade ämnesjärnen. Deras form är anmärkningsvärd och de bör undersökas ytterligare för att om möjligt relatera dem till såväl kända typer av slaggsällor, blästugnar och de spadformade ämnesjärnen.

Från ett av de analyserade ämnesjärnen, prov 1, har material tagits för datering med  $^{14}\text{C}$ -metoden på kol i järnet. Resultatet av den undersökningen blir också en viktig information för hur man på lämpligt sätt bör gå vidare med undersökningar av material och platser i området.

För att få en bättre uppfattning om järnhanteringen på platsen och dess betydelse vore det värdefullt att också i mer detalj undersöka lämningar från järnframställningsprocessen och dess råvaror och biprodukter. Malmtillgången (myrmalm) är god i området och ett flertal slaggförekomster har påträffats. En okulär besiktning av slaggmaterialet kan ge besked om slaggernas karaktäristiska drag vilka till viss del speglar framställningsugnens konstruktion och processens förlopp. Vidare kan kemiska analyser av såväl slaggar som malmer ge besked om deras kemiska släktskap. Eventuella variationer kan förekomma i båda typerna av materialet. Skillnader i slaggernas sammansättning kan också bero på skillnader i järnframställningsprocessen, t ex temperaturen, och proportionerna mellan kol och malm. Genom att jämföra slaggernas och malmernas kemiska sammansättning har man också en möjlighet att beräkna processens effektivitet, dvs hur mycket av malmens järninnehåll har tagits till vara i den framställda produkten och hur mycket har gått förlorat till slaggen. I gynnsamma fall kan man också jämföra slaggernas sammansättning med sammansättningen på slagg som finns innesluten i den färdiga produkten och på så sätt få ytterligare möjligheter att knyta vissa föremål till en bestämd produktionsplats.

Ytterligare undersökningar för att studera vilka järnkvantiteter som har producerats kan lämpligen också genomföras. Delvis gäller detta spadformade ämnesjärn men framför allt metalliskt järn som påträffas på järnframställningsplatser, bland annat järn inneslutet i slagg.



Naturligtvis är det också av största vikt att få kunskaper om hur framställningsugnen var konstruerad och hur arbetet på hela platsen organiserades. Sådan information bör kunna erhållas genom en detaljerad arkeologisk undersökning av någon av framställningsplatserna som kan tänkas ha bevarade ugnrester. Vid en sådan undersökning bör särskild vikt fästas vid att försöka förstå hur ugnen har sett ut i drift. Vilken ugnstyp rör det sig om? Har slaggen tappats ur ugnen? Hur har lufttillförseln skett? Vilken bränsletyp har använts? Hur mycket järn har tillverkats per gång? Detta är endast några av de frågor som bör kunna besvaras. Resultaten från fältundersökningen bör sedan på optimalaste sätt kombineras med analysresultat för att få en så heltäckande bild av verksamheten som möjligt.

## Referenser

- Hallinder, P. 1978. Spade-shaped currency bars. I: Lamm, K. & Lundström, A. (edit.) *Excavations at Helgö V:1 Workshop Part II*, 30-37. Kungl. vitterhets historie och antikvitets akademien, Stockholm.
- Hansson, T. & Modin, S. 1973. A Metallographic Examination of Some Iron Findings with a High Nickel and Cobalt Content. *Early Medieval Studies* 5, 5-23. Antikvariskt Arkiv 50. Lund.
- Tholander, E. 1971. En teknikers funderingar om Norrlands-järn och Tröndelags-salt i förhistoriskt handelsutbyte. *Fornvännen*, 1-17. Uppsala.
- Thålin, L. 1973. Notes on the Ancient Iron Currency Bars of Northern Sweden and the Nickel Alloys of Some Archaological Objects. *Early Medieval Studies* 5, 24-41. Antikvariskt Arkiv 50. Lund.

## Tabeller

Tabell 1. Mikrosondanalyser i viktsprocent av oxid- och silikatfaser i slagginneslutningar i ämnesjärn från Torsåkers sn. Förkortningar: gl = glasfas, wr = totalanalys av flera faser (i detta fall, glas, olivin och wüstit). Krom och koppar ingår också i analysen men dessa ämnen har inte detekterats.

Prov	An.nr.	Fas	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Summa
1	1b1	gl	55,46	0,50	12,07	15,22	0,55	1,94	8,50	1,10	3,07	0,05	98,46
1	3a1	wr	63,97	0,55	13,87	2,68	0,44	2,48	12,86	1,14	3,46	0,06	101,51

Tabell 2. Mikrosondanalyser i viktsprocent av metalliskt järn i ämnesjärn från Torsåkers sn. Analysresultaten för alla andra element än järn ligger i nivå med detektionsgränsen, eller strax därunder. Fosforhalten för analys nummer 2a2 är dock strax över detektionsnivån. Resultatet "0" innebär att ämnet ej är detekterat.

Prov	An.nr.	Fas	Mg	Si	P	S	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Summa
1	1a1	fe	0	0	0	0	0,02	100,11	0,01	0,07	0,06	100,27
1	1a2	fe	0	0	0	0	0,01	98,56	0,01	0,07	0	98,65
1	1a3	fe	0	0	0,05	0	0	98,97	0,04	0,04	0	99,10
1	2a1	fe	0	0	0,02	0,01	0	99,57	0,03	0	0,03	99,66
1	2a2	fe	0,03	0	0,15	0	0	98,21	0	0	0,08	98,47
1	1a3	fe	0	0	0,04	0	0	98,84	0	0,03	0,03	98,95
1	3a2	fe	0	0	0,02	0,03	0	99,04	0,06	0	0,04	99,19
1	3a3	fe	0	0	0,02	0,01	0,01	99,08	0,03	0	0	99,16

### Terminologi

- *Blåsning*: Benämning på en järnframställningscykel i blästugn.
- *Blästbruk*: Äldre, och på nytt använd term för ”primitiv” och ”lågteknisk” järnhantering.
- *Blästeröppning*: Öppning för luft i blästugns schaktvägg.
- *Blästugn*: Ugn för framställning av blästjärn av myr-, sjö-, jord- eller bergmalm.
- *Brottyta*: Ojämn flatsida på lerschaktsfragment som spruckit (vanligen i linje med vidjeameringen) och lossnat från schaktet som ett flak.
- *Chargering*: Uppsättning/påfyllning av malm och bränsle i blästugnen.
- *Droppslag*: Små, sfäriska slaggskal som bildas i blästugn under process.
- *Fingerstruken*: In- och/eller utvändigt lerslammad schaktvägg med fingeravtryck.
- *Forma*: Trattformigt rör av lera, i historisk tid av metall, beläget mellan blästerör på bälg och blästerfokus i ugnens ställe.
- *Förslagging*: Schaktväggspartier (insidor) varpå smält slag har stelnat.
- *Förglasning*: Delar av leran har smält, ändrat färg (vanligen till svart) och i vissa fall blivit genomskinlig eller glasartad. Förekommer på schaktväggens insida, nära blästerintagen.
- *Glödska*: Metallglänsande magnetiska skal av järnoxid som uppkommer i sekundärsmidet när järn bearbetas med kraft på ett järnstäd med slägga eller smideshammare.
- *Grop med slag*: En grop utan närmare anläggningsbestämning fylld med slag och ugnrens (jfr *slaggrup*).
- *Grynjärn*: Samma som malmsylt.
- *Gråbränd*: Lera som bränns i syrefattig miljö blir grå.
- *Innerbit*: Schaktväggsfragment som saknar ytsida.
- *Insida*: Schaktväggsfragment med minst en ytsida, som kan vara förglasad, förslaggad eller som har en buktighet som talar för insida, eller som är rödare på en sida (insidan) än på motstående sida.
- *Lupp*: Smälta som konsoliderats eller blivit omsmält.
- *Magring*: Medel, vanligen kvartssand, barr, hår eller tagel, som leran till schaktet blandas ut med för att den inte ska sprängas av ångtrycket när den blir het.
- *Malmsylt*: Efter reduktion i ugn kvarvarande material som inte kan karakteriseras som malm, inte som järn eller slag, som har reducerat men inte har järn/slagg-separerats. Är knottrigt/grynigt och magnetiskt. Lämpligt material att sätta upp vid nästa blåsning.
- *Primärsmide*: Inledande förädling av smältan, endera i form av omsmältning eller genom upprepad uppvärmning och kompaktering.
- *Reduktion*: Kallas den process som under tillförsel av luft (egentligen syrgas, O<sub>2</sub>) och hetta förmår träkol (eg CO och CO<sub>2</sub>) att reducera malm som huvudsakligen består av järnoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) till järn (Fe) och slag.
- *Rensslag*: Slagg som faller ifrån smältan när den tas ur ugnen eller vid arbetsmomenten kall- och varmrrensning (jfr *ugnsrens*).
- *Rödränd*: Lera som bränns i syrerik miljö blir röd.
- *Sekundärsmide*: Uträckning av kompakterat järn och föremålsmide.
- *Skarvkant*: Fog mellan två lerlimpor i schaktväggen. Ibland synlig på lerväggsfragment.
- *Slaggrup*: Under schaktugn liggande grop för uppsamling av slag, det vill säga gropen fylls med slag redan under processens gång (jfr *grop med slag*).
- *Smälta*: Produkt av reduktionsprocessen. Denna järnklump är slaggrig och inte direkt smidbar. Den behöver upparbetas/förädlas först.
- *Sprutslag*: Små, sfäriska slaggskal som bildas flygande i luften under primärsmidets slutfas, när smältan under värltemperatur kompakteras till ett tätt järn.
- *Stearinslag*: Slaggklump som bildas genom att slaggsträng läggs till slaggsträng. Den erhåller ett utseende som kan associeras till hur rinnande stearin formeras kring foten av ett ljus. Bildas i eller utanför blästugn.
- *Ställe*: Härdrum, det vill säga området där smältan bildas, under blästerintagen men ovanför en eventuell underliggande slagguppsamlingsgrop.
- *Ugnrens*: Material (slag, träkol, infodringsfragment o d) som efter varje blåsning rensas ur ugnen, och kastas i varp, gropar eller på markytan, innan nästa blåsning påbörjas.
- *Uppsättning*: Påfyllning av träkol och/eller malm.
- *Ytbit/ytsida*: Schaktväggsfragment med en fingerstruken eller slätad sida, men oklart om in- eller utsida.

## Allmänt om analyser av arkeometallurgiska material

### Järn

Järn framställs i olika kvaliteter för olika ändamål. *Rent järn* (*Fe*, *ferrit*) är relativt mjukt eller som man brukar säga blött. Man blev tidigt medveten om att om järn innehöll kol fick man en produkt som var hårdare och som kunde härddas dvs man fick ett *stål*. Detta har varit en mycket eftertraktad produkt ända fram i våra dagar. Men om järnet innehåller för mycket kol, 1,5-2%, uppstår svårigheter. Järnet är inte längre smidbart, i varje fall inte utan föregående avkolning. Järn med mer än 2% kol kallas *gjutjärn eller tackjärn*. Det finns i huvudsak två sorter gjutjärn, vitt och grått. Gjutjärn används till olika typer av gjutna produkter t ex grytor. Tackjärnet färskas (dvs avkolas) för att användas till olika typer av stålprodukter med olika stålqualiteter. Ett annat ämne som i halter upp till 1% är bra, för t ex egggar, är fosfor (P). Fosfor gör järnet hårt men sprött, vilket innebär att om järnet innehåller för mycket fosfor blir det vad vi kallar kallbräckt och riskerar gå sönder vid låga temperaturer (Crew & Salter 1993). Fosforhalten i kolfritt järn medför att det ferritiska järnet kristalliserar i två olika strukturer med något olika sammansättning. Den ena strukturen är den normala korngränsformen, den andra, helt utan korngränser återfinns ”ovanpå” ferritstrukturen (Modin & Lagerquist 1978, Hjärthner-Holdar & Larsson 1996; 1997, Salter & Crew 1997; Buchwald & Wivel 1998). Dessa strukturer framträder vid etsning av provet. Fosforinnehållet begränsar också upptaget av kol i järnet. Järnets och dess legeringars hårdhet mäts ofta i Vickershårdhet, HV.

#### Järnet och dess texturer

*Austenit*: En form av järn. Rent järn förekommer som austenit mellan 910°C och 1388°C. Under och ovanför dessa temperaturer förekommer järnet som ferrit. Austenit är omagnetiskt och kan lösa ca 2% kol. I legerade stål kan austenit existera i rumstemperatur och dess hårdhet är ca 150 HV. Vid avsvälning urskiljer austeniten vid vissa temperaturer ferrit eller cementit beroende på kolhalten och ändrar sammansättning vid 723°C där resten av austeniten omvandlas till perlit.

*Cementit*: En förening av järn och kol ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Huvuddelen av stålets kolhalt föreligger som cementit då ferrit löser mycket lite kol. *Cementitlameller* är tunna skivor av cementit som vanligen förekommer i perlit. *Korngräns cementit* är cementit utskild i austenitens korngränser före perlitbildningen vid den eutektoida punkten (se eutektoid) 723°C i övareutektoida stål (över 0,8% kol). Korngräns cementit verkar förspredande.

*Ferrit*: Järn (Fe) med ett kubiskt rymdcentrerat atomgitter (atomgitter = regelbundet arrangemang av atomer), dvs med en järnatom i vardera hörnet och en i centrum på kuben. Rent järn förekommer som ferrit (-järn) upp till 910°C där det omvandlas till austenit. Under 768°C är ferrit magnetiskt. olegerad ferrit har en hårdhet av ca 90 HV vid rumstemperatur. *Korngräns ferrit* är ferrit utskild i austenitkorngränserna före perlitbildningen vid eutektoida temperaturen, 723°C, i undereutektoidiska stål, dvs stål med en kolhalt under 0,8%.

*Järnfosfid*: En förening mellan järn och fosfor ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ). Den är mycket hård men samtidigt spröd - fosforrikt järn är kallbräckt, vilket t ex gör att fosforhalten på 1% P och däröver gör det omöjligt att smida.

*Perlit*: En struktur bildad vid den eutektoida temperaturen (723°C) i en järn-kol-legering. Perliten består omväxlande av lameller av ferrit och cementit som samtidigt skilts ut ur austeniten.

*Stål*: Produkten är smidbar och är en järn-kol-legering med mindre än 2% kol.

*Eutektoid*: En intim blandning av två eller flera kristallina faser i bestämda proportioner samtidigt utskilda ur en fast lösning. *Eutektoid kolhalt* är kolhalten för perlit i jämvikt, vilket i olegerade stål är 0,8%. Den *eutektoida punkten* är den punkt i ett fasdiagram som anger den bestämda temperaturen där reaktionen äger rum samt sammansättningen på eutektoiden. I järn-kol-systemet ligger den eutektoida punkten vid 0,8% kol och 723°C. Undereutektoidiskt stål har lägre kolhalt än 0,8% och övareutektoidiskt stål har en högre kolhalt än 0,8%.

*Widmanstättenferrit*: Ferrit som under relativt hastig svalning urskiljs som skivor som genomkorsar austeniten. Bildningen gynnas av grov austenitkornstorlek. Widmanstättenstruktur kan uppstå i både under- och övareutektoida stål. De båda typerna kan dock skiljas åt.

#### Smidesmetoder

*Vällning*: Sammanfogning av järnstycken genom smidning. Som hjälpmedel kan användas t ex vällsand, huvudsakligen kvartssand ( $\text{SiO}_2$ ). *Vällsömmar* är mer eller mindre synliga sömmar mellan järnstycken som vällts samman.

*Hårdning*: Upphetning till austenitområdet (se austenit) med en påföljande snabb avkyllning i t ex vatten. Erhållen struktur kallas *martensit*. Den är hård och spröd utom vid låga kolhalter. Martensit omvandlingen är i stora delar inte

tidsbunden utan mängden bildad martensit beror, för en given austenitsammansättning, istället på den temperatur till vilken kylningen skett.

*Anlöpning:* Värmebehandling av härdat stål för att moderera dess hållfasthetsegenskaper. Anlöpning innebär att stålets sprödhet minskar men att dess seghet ökar.

## Okulär klassificering av slagger

Slagger är biprodukter från olika slags metallurgisk verksamhet. Reduktionsslagger bildas vid reducering av malm till metall. Reduktionsslagger, d v s slagger som uppstår vid t ex framställning av järn har vanligen en densitet på ca 3 kg/dm<sup>3</sup>, de har en tämligen homogen sammansättning samt visar flytstrukturer t ex som rinnande stearin (typiska för t ex Bergslagens stenrams ugnar). Ugnar med anordning för slaggtappning kan ge lättflutna tappslagger. Många ugnar har infodrats med lera vilken är bränd, delvis smält samt vanligen förslaggad genom inblandning av reduktionsslag.

Smidesprocessen kan underdelas i primärsmide (omsmältning och/eller rensning av smältan från slaggen) och sekundärsmide (tillverkning av föremål). Karaktäristiskt för plankonvexa primärsmidesskällor är att de är homogena i sammansättning och temperaturprofil. Karaktäristiskt för sekundärsmidesskällor är att de är heterogent skiktade, har sand/grus och kol främst i bottenpartiet, samt att de oftast känns lättare än reduktionsslaggen. Slagger från sekundärsmidet är genom inblandning av vällsand oftast mycket sura i sina sammansättningar samt glasiga och således vanligen lätta att skilja från reduktionsslagger.

### Slaggtyper

*Reduktionslagg:* Slagg som bildas i samband med smältning av malm i ugn.

*Primärsmidesslagg:* Slagg som i järnsmidet bildas under den inledande konsolideringsfasen.

*Sekundärsmidesslagg:* Slagg som i järnsmidet bildas under uträkningsfasen och under föremålssmidet.

*Glödskal:* Oftast starkt magnetiska oxidskal som bildas vid smidning. Vissa typer brukar också kallas hammarskal.

*Sprutslagg:* Små, ca 5 mm stora, sfäriska, ihåliga, magnetiska slagggkuler som bildas flygande i luften när smältan/luppen välls ihop.

*Stearinlagg:* Slagg som runnit neråt i strängar och där sträng lagts till sträng på samma sätt som stearin stelnar kring foten av ett ljus.

## Slaggers mineralogiska sammansättning

De flesta slagger består av *glas* (med varierande sammansättning) samt en eller flera av följande kristallina faser:

*Oliviner*, silikatmineral med den allmänna formeln  $A_2SiO_4$ , där A oftast är järn (mineralet heter då fayalit, det vanligaste mineralet i järnblästerslagger samt kopparslagger), magnesium (forsterit, förekommer i masugnsslagger) eller mangan (tefroit). Mangan ingår också i fayalit. Vissa slagger innehåller kalciumrika oliviner, främst kirschsteinit  $Ca-FeSiO_4$ , som sent bildat fas. Olivinerna uppträder oftast som väl utkristalliserade faser.

*Wüstit*, FeO, är vanligt i blästerslagger. Fasen bildas vid reduktion av järnoxider (från hematit  $Fe_2O_3$  via magnetit  $Fe_3O_4$ , eller direkt från magnetit) och reduceras själv till metalliskt järn. Wüstit bildar oftast droppformade, dendritiska (=”trädliska”) kristaller. Sammansättningen kan variera från  $FeO_{1,00}$  till  $FeO_{1,16}$ ; förutom järn kan mangan och smärre mängder titan eller aluminium ingå.

*Magnetit*,  $Fe_3O_4$ , är ett primärt järnmineral och bildar huvudbeståndsdelen i de svenska bergmalmen (”svartmalm”). Jämfört med wüstit kännetecknar magnetit högre temperaturer och/eller högre syretryck. Den förekommer således i masugnsslagger (högre temperatur) samt smidesslagger (högre syretryck). Magnetit uppträder oftast som oktaedriska kristaller.

*Hercynit*,  $FeAl_2O_4$ , är liksom magnetit ett spinellmineral som bildar väl formade oktaedriska kristaller. Dessutom uppträder hercynit sammanvuxen med fayalit. Hercyniten indikerar relativt höga aluminiumhalter (t ex inblandning av lerklining i slaggen).

*Pyroxener* är en mineralgrupp med den allmänna formeln  $A_2Si_2O_6$ , varvid A = Fe, Mg, Mn, Ca. Pyroxener indikerar överskott på kiselsyra och är typiska för masugnsslagger. De kan även vara ett tecken på att flussning med kvartssand har ägt rum.

*Leucit* är ett kaliumrikt aluminiumsilikat med formeln  $KAlSi_3O_8$  som indikerar alkaliöverskott.

*Metaller*, t ex metalliskt järn eller koppar, uppträder ofta som små droppar i järn- respektive kopparslagger.

*Limonit* består av bruna, amorfa järnhydroxider med varierande sammansättning. Limoniten är huvudbeståndsdel i t ex sjö- eller myrsmalm samt i ”rost”. Den senare bildningen är alltså sekundär.

Det inbördes förhållandet mellan olika faser ger information om olika kristallisationsförlopp, medan kristallstorleken är ett tecken på avsvalningshastigheten. För att beskriva detta används några geologiska (jfr TNC86) och kemiska begrepp:

*Dendrit* beskriver ett mineral som kristalliserat i ormbunks- eller trädliknande mönster. I slagger är wüstit vanligtvis *dendritiskt* utbildad.

*Euhedral* beskriver ett mineral med väl utbildade kristallytor. Är endast några kristallytor utbildade talar man om *subhedral*, utan kristallytor om *anhedral*.

*Jämvikt* är i dagligt tal ett stabilt tillstånd. Verklig jämvikt föreligger när ett (kemiskt) system har nått ett tillstånd från vilket det inte har någon tendens att ändra sig (Hägg 1964, s. 45).

*Kristallit* är en mycket liten (mikroskopisk till submikroskopisk) kristall.

*Textur* är en bergarts eller en slaggs mikroskopiska utseende och egenskap. Exempel på texturella drag är kornstorlek, kornform, kristallform, orientering, kristallinitet och porositet.

## Slaggers kemiska sammansättning

Under reduktionsprocessen - t ex järnproduktionen - råder betingelser som närmar sig jämvikt. Detta återspeglas i relativt homogena sammansättningar hos såväl glas som kristaller, frånvaro av zonerings och dylikt. Bristande eller saknad jämvikt yttrar sig i starkt varierande sammansättningar, även inom en kristallindivid (dvs zonerings eller överväxning). Detta indikerar starkt växlande temperaturbetingelser och/eller relativt kortvariga processer, t ex som vid smide eller gjutning.

Som komplement till petrografen, dvs den mikroskopiska undersökningen, utförs rutinmässigt *mikrosondanalyser*. På detta sätt får man kvantitativa kemiska data över sammansättningen av glaserna och de olika kristallina faserna. Analyserna ger en detaljerad inblick i kristallisationsförlopp samt upplysning om jämviktstillstånd infunnit sig eller inte. Under jämviktsbetingelser fördelar sig t ex järn, mangan och magnesium mellan utkristalliserad olivin och glassmältan på ett lagbundet sätt. Fördelningen är beroende på rådande temperatur (= jämviktstemperatur), som kan beräknas för olivin-glas-par enligt Leeman & Scheidegger (1977; se även Hjärthner-Holdar 1993:113f). En förutsättning är att nödvändig tid för att uppnå jämvikt funnits. Denna tid kan variera från flera timmar till några dagar - ju lägre temperatur desto längre tidsfaktor.

Enligt Leeman & Scheidegger (1977) kan man anta att jämvikt rått vid kristallisationen om de tre beräknade temperaturerna inte skiljer sig åt mer än 100°C. olivin-glastermometern bygger på en sammansättning av basaltiskt bergartsmaterial som alltså skiljer sig i sammansättning från slaggernas grundmassa. Det har ändå påvisats att beräknade kristallisationstemperaturer för jämviktsfördelningen av järn och mangan kan tillämpas (Kresten, Larsson & Hjärthner-Holdar 1996) för att skilja reduktionslagger från smidesslagger under förutsättning att ett tillräckligt antal analyser utförts.

*Totalkemiska analyser* används huvudsakligen för att bedöma vilken malmtyp som använts, samt för att granska den totala massbalansen under processen. Ändringar i den totalkemiska sammansättningen kan härledas från olika metallurgiska processer. Vid reduktionen av en malm extraheras metalliskt järn, vilket innebär att samtliga element som inte ingår i denna metallfas anrikas i slaggen relativt till malmen. Slaggen kan i varierande grad tillföras material från ugnen (t ex smält lera), från träkolsaskan och från flussmedel, om sådant använts. Reduktionsslaggerna kan således ses som en koncentration av de element som inte extraheras tillsammans med järnet, samt yttre tillskott.

Under smidet sker en rad olika förändringar. Generellt är dock att materialet, dvs såväl järnet som innesluten eller omgivande reduktionsslagg, oxideras. Därtill kommer differentiationsprocesser genom att smält slag pressas ut ur järnet, medan kristalliserade faser förväntas att bli kvar. Resorption av träkolsaska samt av fodringmaterialet till äs-sjan förväntas äga rum. De mest dramatiska förändringarna i den kemiska sammansättningen sker dock när vällsand kommer till användning. Sammantaget kan smidesslaggerna således förväntas vara produkten av oxidations- och utspädningsprocesser.

### *Normativa beräkningar*

Beräkningen av normativa komponenter utifrån en kemisk analys innebär att viktsprocenten av oxiderna som ges i analysen omvandlas till (beräknade) mineralfaser, vilka oftast ges i molprocent, mer sällan i viktsprocent. Därmed underlättas bli en jämförelse med resultaten från de petrografiska analyserna.

Beräkningsmetoden är sedan länge etablerad inom geologin (Cross m fl, 1903). För förhistoriska slagger har metoden introducerats av Kresten & Serning (1983), med senare vidareutveckling (Kresten 1984). Den har sedan dess modifierats något för att så mycket som möjligt vara anpassad till förhistoriska slaggers observerade mineralogiska

sammansättningar. Därutöver har anpassning skett till såväl observerade kristallisationsföljder av slagger samt kristallisationssekvenser som kan förväntas från geokemiska principer.

#### *Fysikaliska parametrar*

Totalkemiska analyser kan användas för beräkning av fysikaliska egenskaper såsom viskositet (Bottinga & Weill 1972; Shaw 1972) och densitet (Bottinga & Weill 1970; Bottinga, Weill & Richet 1982; diskussion av Hall 1987 p. 67 ff). I samband med normativa beräkningar utförs även beräkningar av viskositet (Shaw 1972) och densitet (Hall 1987), båda parametrar gällande för en temperatur på 1250°C dvs flytande tillstånd. Till skillnad mot t ex vulkaniska lavabergarter vilkas innehåll av lösta gaser förorsakar att beräkningar blir endast approximativa (Hall 1987) är slagger relativt "torra" produkter och förväntas ge mer pålitliga resultat.

*Yttrium (Y) och sällsynta jordarter (Rare Earth Elements, REE): lantan (La)-lutetium (Lu)* är namnet till trots mycket vanliga spårelement. De förekommer som ersättare för huvudelementen (t ex kalcium, järn, magnesium) i bergartsbildande mineral samt bildar egna mineral, främst i pegmatitmiljö. Man skiljer mellan "lätta sällsynta jordarter" dvs La-Eu som är relativt stora joner, och "tungta sällsynta jordarter" dvs gadolinium (Gd)-Lu samt Y som är mindre joner. Valenstalet är oftast tre, men cerium (Ce) uppträder fyrvärt och europium (Eu) tvåvärt. I slagger förväntas elementen förekomma både i glas och utkristalliserade silikatfaser (olivin, pyroxen).

Utvärderingen av sällsynta jordarters fördelning i geologiska material sker konventionellt genom att jämföra s k kondritnormaliserade kurvor. Dessa erhålls genom att dividera halten av varje enskilt element med halten på motsvarande element i en kondrit dvs stenmeteorit som används som referens. Denna metod skapades dels för att eliminera effekten av Oddo-Harkins regel, nämligen att grundämnen med jämna atomnummer är mer frekventa än de med udda atomnummer, dels för att meteoriter är s k "primitivt material" i meningen att de inte deltagit i senare omsmältning-, omvandlings- eller vittringsprocesser. För normaliseringen har vi valt "Chondrite CI average" (Evensen, Hamilton & O'Nions 1978).

*Variationsdiagram* används för att grafiskt åskådliggöra variationen i huvud- och spårelementhalterna. Liksom för sällsynta jordarter används även här normaliseringsmetoden, dock med referensslaggen W-25:R från Gryssen (Kresten & Hjärthner-Holdar 1994) som referens. Elementen är ordnade på så sätt att de som är mest benägna att ingå i smältan återfinns på diagrammets vänstra sida, medan elementen som är benägna att ingå i metallfasen återfinns mot höger.

## **Slaggers magnetiska egenskaper**

Alla prover testas med handmagnet och magnetiseringsgraden återges i en skala från omagnetisk till starkt magnetisk. Denna karaktäristik blir givetvis något subjektiv. Stundom är de magnetiska egenskaperna inte homogent fördelade inom ett slaggstycke. I dessa fall återges variationerna samt en uppskattning av fördelningen.

## **Referenser**

- Bottinga, Y. & Weill, D.F. 1970. Densities of liquid silicate systems calculated from partial molar volumes of oxide components. *American Journal of Science* 269, 169-182.
- Bottinga, Y. & Weill, D.F. 1972. The viscosity of magmatic silicate liquids: a model for calculation. *American Journal of Science* 272, 438-475.
- Bottinga, Y., Weill, D.F. & Richet, P. 1982. Density calculations for silicate liquids. I. Revised method for aluminosilicate compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46, 909-919.
- Buchwald, V.F. & Wivel, H. 1998. Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. *Materials Characterization* 40, 73-96.
- Crew, P. & Salter, C. 1993. Currency bars with welded tips. s. 11-30 i Espelund, A. (edit.) "Bloomery ironmaking during 2000 years. Seminar in Budalen 1991." Trondheim.
- Cross, W., Iddings, J.P., Pirsson, L.V. & Washington, H.S. 1903. *Quantitative classification of igneous rocks*. University of Chicago Press.
- Evensen, N.M., Hamilton, P.J. & O'Nions, R.K. 1978. Rare-earth element abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42, 1199-1212.
- Hall, A. 1987. *Igneous Petrology*. Longman Scientific & Technical, New York. 573 pp.
- Hjärthner-Holdar, E. 1993. Järnets och järnmetallurgins introduktion i Sverige. Med bidrag av Peter Kresten och Anders Lindahl. *Aun* 16, Uppsala.
- Hjärthner-Holdar, E. & Larsson, L. 1996. Järnhantering i det medeltida Söderköping (1130-1400) - analys av ämnesjärn och slagger, Östergötland, Söderköping, RAÄ14. Analysrapport 22-1996, Geoarkeologiskt Laboratorium, UV Uppsala.
- Hjärthner-Holdar, E. & Larsson, L. 1997. Ämnes- och stångjärn från kv Vågtorget - en arkeometallurgisk analys, Västmanland, Köping, RAÄ148. Analysrapport 35-1997, Geoarkeologiskt Laboratorium, UV Uppsala.
- Hägg, G. 1964. *Allmän och oorganisk kemi*. Tredje upplagan. Almqvist & Wiksell, Uppsala.

- Kresten, P. 1984. The mineralogy and chemistry of selected ancient iron slags from Dalarna, Sweden. With contributions by Inga Serning. *Jernkontorets forskning H29*. Stockholm.
- Kresten, P. & Serning, I. 1983. The Calculation of Normative Constituents from the Chemical Analyses of Ancient Slags. - *Jernkontorets Forskning H25*. Stockholm.
- Kresten, P. & Hjärthner-Holdar, E. 1994. First Compilation of Analytical Data on the Swedish Ancient Iron Slag Standard Reference Material W-25:R. Manuskript inlämnat till *Journal of the Historical Metallurgy Society*.
- Kresten, P., Larsson, L. & Hjärthner-Holdar, E. 1996. Thermometry of ancient iron slags from Sweden, and of vitrified material from various hill-forts in western Europe. *Research Report R-9601*, Geoarchaeological Laboratory, UV-Uppsala.
- Leeman, W.P. & Scheidegger, K.F. 1977. Olivine/liquid distribution coefficients and a test for crystal-liquid equilibrium. *Earth and Planetary Science Letters* 35, 247-257.
- Modin, S. & Lagerquist, M. 1978. The metallographic examinations of rod-shaped blanks. I: Lamm, K. & Lundström, A. (edit.) *Excavations at Helgö V:1 Workshop Part II*, 110-150. Kungl. vitterhets historie och antikvitets akademien, Stockholm.
- Salter, C. & Crew, P. 1997. High phosphorus steel from experimentally smelted bog-iron ore. I: Crew, P & S (edit.) *Early Ironworking in Europe archaeology and experiment*, 83-84. Abstracts. Plas Tan y Bwlch.
- Shaw, H.R. 1972. Viscosities of magmatic silicate liquids: An empirical method of prediction. *American Journal of Science* 272, 870-893.
- TNC 86, 1988. Geologisk ordlista. glossary of Geology. *Tekniska nomenklaturcentralens publikationer nr 86*. Stockholm.

## **Geoarkeologiskt Laboratorium**

**Lars-Erik Englund, Eva Hjärthner-Holdar, Peter Kresten, Lena Grandin**