

Eksperimenter med oldtidens jernudvinding

På Ribe Vikingecenter 1999-2004

Michael S. Nissen



Ribe Vikingecenter, 17. juli 2004. En luppe på ca. 3,5 kg smedes på træstub med træhammer. Luppen blev udtaget af ovnen i vikingecenterets åbningstid, kun ca. 4 timer efter første malmpåfyldning, så publikum havde mulighed for at se smede-processen. Materialeforbruget var 40 kg trækul og 30 kg ristet myremalm.

Siden 1999 har jeg hver sommersæson udført en række forsøg med oldtidens jernfremstillingsmetoder på Ribe Vikingecenter. Forsøgene er især blevet hjulpet på vej af et gavmildt tilskud fra Ribe Jernstøberi, hvilket bl.a. har muliggjort indkøbet af en stor mængde god myremalm, og uden dette tilskud havde det bestemt ikke været muligt at opnå de spændende resultater, som tilfældet er. Forsøgene ville heller ikke have været mulige uden de mange nye idéer og hjælpende hænder, som både ansatte og frivillige ved vikingecenteret har bidraget med – ingen nævnt, ingen glemt.

Jernudvindingsforsøgene har ikke haft til formål at belyse nogle specifikke arkæologiske problemstillinger, som de udvindingsforsøg, der er blevet udført på Moesgaard og Lejre Forsøgscenter. De er derimod blevet udført med det formål at genopdage og genoplive oldtidens jernfremstilling som håndværk med grundlag i den viden om emnet, der i dag er tilgængelig. Mens forsøgene har stået på, har der samtidig været rig lejlighed til også at fremvise processen og dens resultater for vikingecenterets publikum og derved levere en omfattende formidling omkring oldtidens jernudvinding, som jeg ikke tror, man har set mage til andre steder i landet.

De første jernudvindingsforsøg var famlende og usikre, men med tiden har jeg udviklet en metode, hvis resultater har en vis lighed med de spor efter jernfremstilling, arkæologerne finder. At metoden rent faktisk også kan bruges til at fremstille rimelige mængder smedbart jern og stål, gør ikke sagen mindre interessant. Med den metode jeg anvender, kan man i løbet af 6-8 timer omdanne ca. 35 kg ristet myremalm til en smedbar jernluppe på 4½ - 5½ kg. I praksis varierer resultaterne naturligvis

en del, da forsøgene næppe kan siges at foregå under strengt kontrollerede forhold. I øjeblikket er jeg ved at udfærdige en rapport, hvori jeg beskriver forsøgene og mine konklusioner i detaljer, men jeg kunne desværre ikke nå at færdiggøre rapporten, så den kunne komme med på denne Cd-rom.

I stedet har jeg skrevet denne kortfattede artikel, der er et sammendrag af flere vigtige pointer fra rapporten. Artiklen er hverken tænkt som en redegørelse for mine forsøg eller som en generel indføring i oldtidens jernfremstilling, men snarere som en lille praktisk vejledning til andre, der måtte have lyst til at eksperimentere med dette spændende og vanskelige håndværk. En komplet beskrivelse af jernudvindingsprocessen lader sig ikke komprimere ned på de få sider, som denne artikel af tidsmæssige grunde er begrænset til. Derfor har jeg valgt at koncentrere mig om de områder af jernudvindings-håndværket, som jeg af erfaring ved er særlig vanskelige at få til at fungere i praksis, eller som på en eller anden måde er centrale for forståelsen af, hvordan jernudvindingsprocessen fungerer.

Denne artikel består af fem dele: Et indledende afsnit om kunsten at formidle jernudvinding til publikum, en beskrivelse af, hvordan man bygger en velfungerende ovn, en beskrivelse af, hvordan jernudvindingsprocessen fungerer, et afsnit om jernudvindings-slaggen og til sidst en selvstændig, kortfattet "bageopskrift", som interesserede kan støtte sig til, når de udfører deres egne eksperimenter med oldtidens jernfremstilling. God læselyst!

Rejsby d.18. marts 2005

Michael Schmidt Nissen

Hvordan formidler man jernudvinding til publikum?

De mange jernudvindingsforsøg, jeg har udført gennem de sidste 6 år, har selvfølgelig haft det umiddelbare formål at genskabe oldtidens jernudvindingsprocesser. Men med tiden er jeg blevet mere opmærksom på, at der ligger en lige så vigtig opgave i at formidle og fortælle om jernudvindings-håndværket. Gennem mine år på Ribe Vikingecenter har jeg brugt megen tid på at fortælle publikum om oldtidens jernudvinding, og jeg har glædet mig meget over den nysgerrighed og spørgelyst, hvormed de fleste mennesker møder dette forholdsvis ukendte håndværk. Men jeg har også ofte oplevet, at folk blev meget overraskede, når jeg fortalte dem om den metal-teknologi, som jernalderens og vikingetidens mennesker beherskede.

En sjælden gang har jeg oplevet, at folk ligefrem reagerede med mistro, når jeg fortalte om oldtidens jernfremstillings- og smedeteknikker, og i et ekstremt tilfælde er jeg blevet affejet med den konstaterende bemærkning "De havde da ikke jern i vikingetiden!".

Det forekommer mange mennesker utroligt, at jernet var almindeligt kendt herhjemme for mere end 2000 år siden, og at man allerede dengang forstod at fremstille det af lokale malme. Jernudvindings-håndværket var ikke blot kendt og anvendt herhjemme i vikingetiden, det var allerede på det tidspunkt en langt ældre teknik, end brugen af højovne er i dag. Forestillingen om, at jern- og stålteknologien er en nyere opfindelse, tror jeg skyldes den generelle misforståelse, at alle væsentlige opfindelser og opdagelser er gjort i nyere tid. Det er langt fra altid tilfældet, og som eksempel skal det i forbifarten blot nævnes, at så "moderne" hjælpemidler som tandhjulet og differentialen begge er opfundet før eller omkring Kristi fødsel. På grund af den slags almindeligt udbredte misforståelser er det meget vigtigt, at der finder en god formidling sted, ikke bare omkring jernudvinding men også omkring resten af historien.

Der er også andre vanskeligheder forbundet med at formidle oldtidens jernudvinding, og én af dem tror jeg skyldes, at jernudvinding i modsætning til langt de fleste af oldtidens håndværk ikke drejer sig om formgivning af et allerede eksisterende materiale. Smeden, tømreren, trædrejeren og kammageren har alle den fordel omkring formidlingen af deres håndværk, at *formgivningsprocessen* og naturligvis det færdige produkts *form* er et helt centralt aspekt. Håndværkerne kan

viser, hvad de gør. Publikum kan se, hvordan kniven tager form under smedens hammer; hvis ikke æggens vinkel og knivsbladets længde og krumning er helt rigtig, så duer kniven ikke. Publikum kan se, hvordan hørkoften tager form mellem sypigens flittige hænder; hvis ærmelængde, livvidde og halsudskæring ikke passer til den kunde, der bestilte koften, så duer den ikke.

Sådan forholder det sig ikke med jernudvindings-håndværket. Det er grundlæggende forskelligt fra de fleste andre håndværk derved, at det netop ikke drejer sig om formgivning af et materiale, men derimod om *skabelsen* af et. Jernfremstilling af myremalm er en formløs, kemisk proces, der let kan virke abstrakt og fjern for den almindelige tilskuer. Processen er til og med usynlig – den er gemt væk i en uanselig lerovn, hvis jævne udseende ikke ligefrem signalerer, at den bruges til at udføre et af jernalderens og vikingetidens helt primære og grundlæggende håndværk.

Det kan give en del problemer, når man forsøger at forklare for publikum, hvor vigtigt et håndværk jernfremstilling var for oldtidens mennesker. Opgaven bliver ikke lettere af, at man som formidler i bedste fald kan fremvise en ujævn, grå jernklump på 4-5 kg, hvilket ikke imponerer særlig mange moderne mennesker. Jeg sporer også en del skuffelse hos publikum over, at jernet ikke kommer *ud* af ovnen mens jernudvindingsforsøget står på – en forestilling, der er hentet fra den mere moderne produktion af råjern, der netop tappes ud af højovnene i flydende form.

Men hvordan formidler man da jernudvindings-håndværket på en måde, så det bliver levende og relevant for publikum – så de husker det, de oplevede? Min erfaring er, at det sker allerbedst gennem *fortælling*. Der skal gode historier på bordet.



Et par "mystiske" symboler indridset i jernudvindingsovnen er ofte alt, hvad der skal til for at få publikum i tale. Hverken børn eller voksne kan dy sig for at spørge om betydningen af de rødmalede tegn.

Til venstre ses Thors Hammer. Thor er en jævn og folkelig gud, og han kan påkaldes i mange forskellige sammenhænge. Han er god at have med i forbindelse med jernudvinding, da han jo i én eller anden forstand også er vejrgud, og specielt fordi han repræsenterer torden og *lynild*. Meget tyder på, at der er en intim forbindelse mellem Thors hammer og vikingetidens ildstål, der ofte findes sammen i form af små amuletter.

I midten ses det allestedsnærværende, altfavnende solhjul. Det findes og genfindes verden over i utallige afskygninger, og naturligvis har det også sin plads på jernudvindingsovnen.

Til højre ses sagnhelten Vølund Smed, der er kommet med på ovnen i mangel af en egentlig nordisk smedegud som grækernes Hefaistos og romernes Vulcan. Når publikum spørger "hvem er Vølund Smed?", kan man jo passende fortælle historien om dengang, Vølund omdannede jern til stål ved hjælp af gåsemøg, og hvordan han af stålet smedede sværdet Mimung, hvormed han kunne flække sin modstander Æmilias fra top til tå med ét eneste hug! Sådanne fortællinger efterlader et lige så uudsletteligt indtryk hos publikum, som den flotteste vikingehal eller den mest realistiske kamp-opvisning.

Jeg føler mig fristet til at beskrive dette forhold med det gamle ordsprog "Hvad udadtil tabes må indadtil vindes", forstået på den måde, at alt det, man som formidler ikke kan fremvise for publikum i den ydre verden, det må man gennem fortælling skabe for deres indre blik. Det er én af hjørne-stenene i al god formidling.

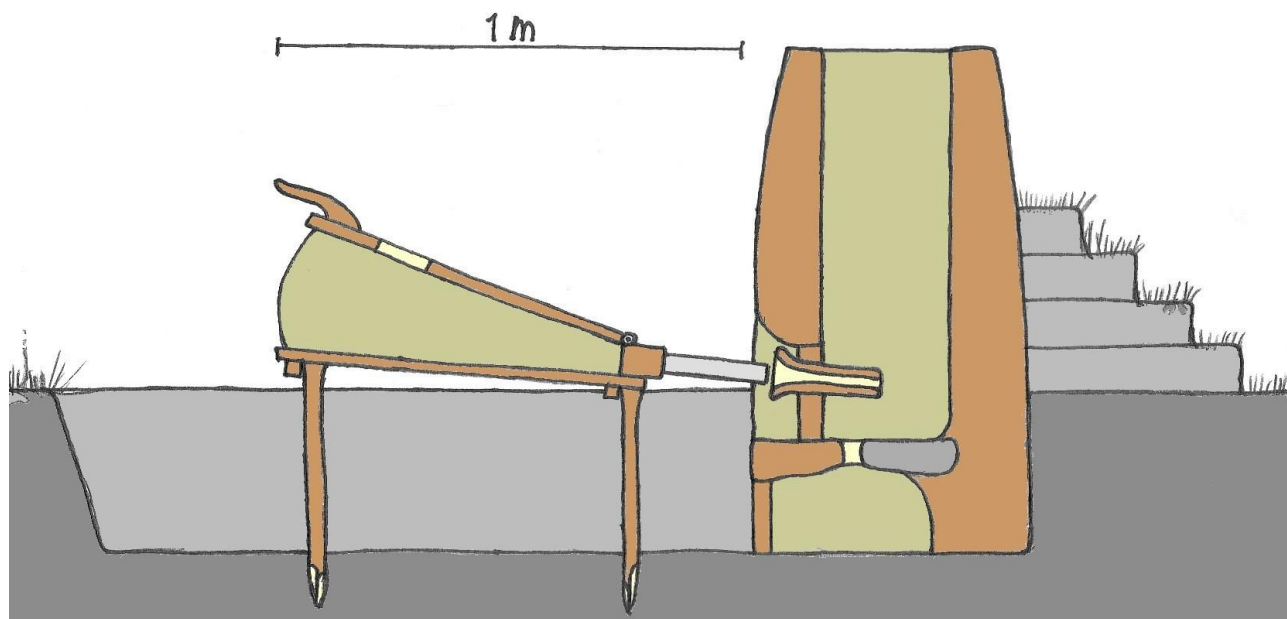
Der findes utallige måder at fortælle om jernet på. Hvilken måde, der er den bedste, kommer helt an på publikum. Nogle vil gerne høre om det videnskabelige grundlag for jernudvinding, altså hvordan processen fungerer rent kemisk, hvordan jernets sammensætning er i forhold til moderne stål, ovnens udnyttelsesgrad i forhold til moderne højovne osv. Andre er mere interesserede i den

historiske vinkel, altså hvor, hvornår og hvordan jernfremstilling er opstået, hvornår håndværket kom til Danmark, og hvordan det har udviklet sig til den stålindustri, vi kender i dag. Atter andre har interesse i det tekniske og håndværksmæssige aspekt, dvs. hvordan ovnen er bygget, hvordan man udfører jernudvindingsprocessen, hvordan man fremskaffer god myremalm, og hvordan man behandler luppen, så den bliver til smedbart jern.

Som håndværker er man naturligvis nødt til at vide meget om disse emner, men som formidler er det især vigtigt, at man også formår at gøre stoffet spændende og relevant for publikum – at man forstår at gøre sin formidling til en *fortælling* og ikke blot en opremsning af tørre fakta. Oprindeligt var det meningen, at jeg her ville fortælle et par af de gode jern-anekdoter fra astronomiens, metallurgi- og historiens og ikke mindst fra mytologi- og verdens, jeg benytter mig af i formidlingen. Men jeg er bange for, at jeg derved vil bevæge mig væk fra denne artikels egentlige emne og ikke tættere på, hvad der jo var hensigten. Jeg vil derfor blot opfordre de læsere, der selv har interesse i at formidle, til at gå på jagt efter sådanne gode historier. Især fortællingerne om de gamle smeltmestre og smede som Vølund, Regin og Skallagrim vækker glæde blandt publikum.

Hvordan bygger man en ovn, der fungerer?

Som forlæg for mine ovnkonstruktioner har jeg især benyttet mig af de to nært beslægtede ovntyper, der almindeligvis omtales som Skovmark-ovnen og Espevej-ovnen. Begge ovntyper stammer fra keltisk (førromersk) jernalder, og man mener, at de har været ret udbredte herhjemme fra ca. 200 f. Kr. til 100 e. Kr. Der er gennem arkæologiske udgravninger indsamlet så megen viden om disse ovntyper, at det er muligt at komme med kvalificerede forslag til deres udseende, men ovnenes mere præcise morfologi, typologi og virkemåde diskuteres stadig blandt arkæologer og metallurger. Jeg mener også at spore en vis uenighed blandt fagfolk om, hvorvidt der overhovedet er tale om to forskellige ovntyper, eller om Espevej- og Skovmark-ovnen blot er to konkrete eksempler på regionalt forskellige udformninger af den samme ovntype. I hvert fald tegner der sig ikke noget helt entydigt billede af ovnene i de videnskabelige artikler, der er udgivet om emnet. For nylig har Olfert Voss (2004) publiceret en artikel, hvori han gør rede for en helt ny og grundlæggende anderledes tolkning af disse ovnes udseende baseret på nye velbevarede fund.



Med en ovnkonstruktion omtrent som denne udførte jeg mine første vellykkede jernudvindingsforsøg. Slaggen tappes ikke ud af ovnsiden, men løber gennem en sprække i bunden af ovnen, der fører ned til et aflukket slagge- og smelteluge. Ovnene fungerer fint, men det kan medføre alvorlige problemer, hvis slaggen sætter sig fast i ovnbunden, da det ikke er muligt at fjerne denne slagge, mens udvindingen er i gang.

Den mere eller mindre korrekte rekonstruktion, jeg benytter mig af, bygger især på de særlige kendetegn ved Espevej/Skovmark-ovnen, at:

–Ovnen og tilhørende arbejdsgrube til blæsebælge er gravet omtrent $\frac{1}{2}$ m ned i jorden.

–Ovnrøret er cylindrisk eller let konisk og har en omtrentlig indre diameter på 30 cm. Højden kendes ikke, men den vurderes til at have været ca. 1 m.

–Ovnen har en firkantet åbning nær bunden, der under jernudvindingen er lukket med en såkaldt dyseplade. I denne plade er der en lille konisk åbning, hvorigennem luften blæses ind i ovnen. Når jernudvindingen er afsluttet fjernes dysepladen, hvorpå luppen udtages gennem åbningen.

–Under ovnen findes et såkaldt slaggerum, dvs. en lille aflukket fordybning, hvor slaggerne kan flyde ned og samle sig i løbet af jernudvindingsprocessen. I modsætning til skaktovne af Drengsted/Scharmbeck-typen kan disse slagger fjernes efter udvindingen uden at ovnen beskadiges, hvilket gør det muligt at anvende den flere gange.

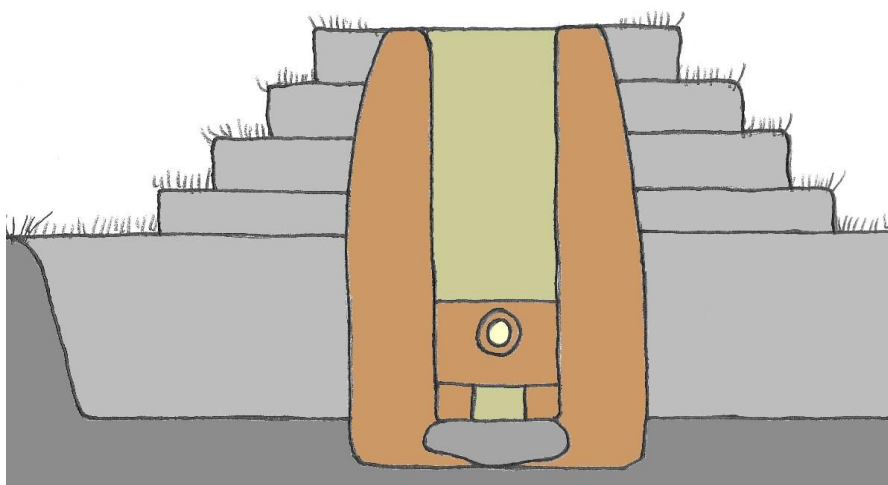
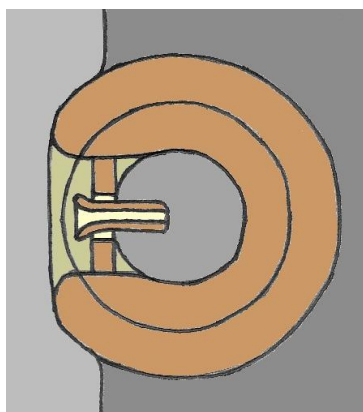
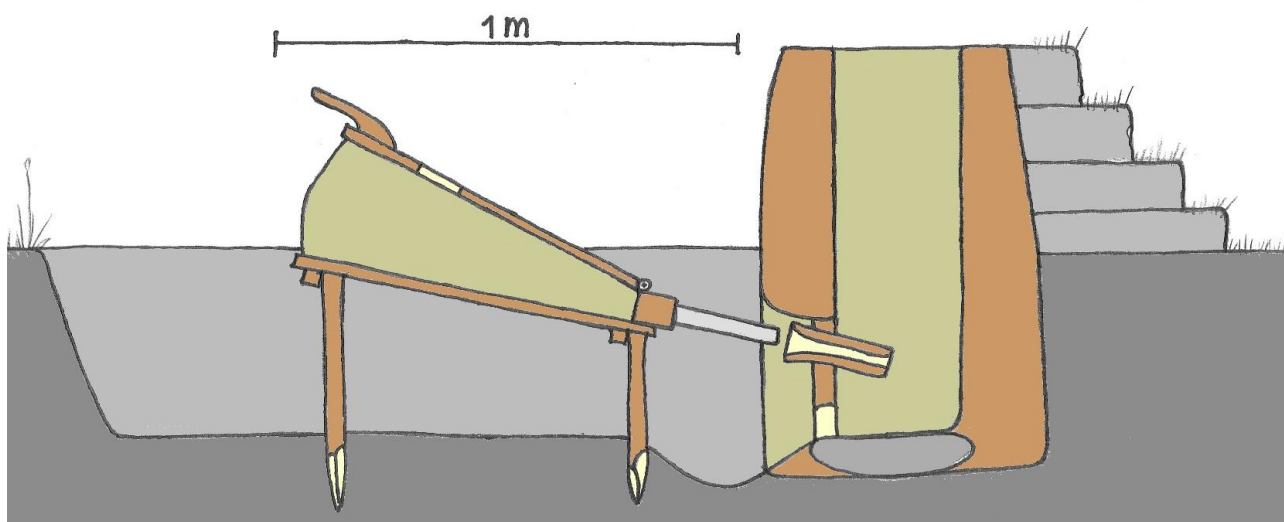
På grundlag af disse kendetegn har jeg siden 2000 bygget og afprøvet en række forskellige ovnkonstruktioner. De første eksperimenter medførte et noget blandet resultat, dels fordi den anvendte myremalm var af middelmådig kvalitet, dels på grund af manglende kendskab til en række vigtige detaljer omkring jernudvindingsprocessen. Med tiden har jeg ændret ovnkonstruktionen på en række punkter, hvoraf den vigtigste er tilføjelsen af en luftdyse. De seneste år har jeg desuden primært arbejdet med en fortolkning af Espevej/Skovmark-ovnen, der fungerer uden slaggerum. I stedet tappes slaggen gennem et hul under dysepladen, hvilket medfører den store fordel, at man kan studere slaggen mens udvindingsforsøget står på.



Jernudvindingsforsøg d. 8. august 2001. Ovnen ligner Espevej/Skovmark-ovnen på en række punkter. I løbet af $2\frac{1}{2}$ time påfyldtes ca. 20 kg malm. Resultatet blev en luppe på knap 1,3 kg.

På fotoet ses vikingesmeden Bent Dahlin, der også har eksperimenteret med jernudvinding i en årrække.

Grunden til at jeg har valgt disse ovntyper som udgangspunkt for mine eksperimenter, er at de er meget stabile og holdbare. De første forsøg, jeg udførte på Ribe Vikingecenter, foregik i tyndvæggede sideaftapningsovne af den type, man mener blev anvendt i vikingetiden. Men disse ovne er skrøbelige og holder kun til én udvinding, og det er uheldigt, hvis man som jeg havde planer om at udføre en forsøgsrække med hver ovn. En meget stor del af tiden gik med at bygge nye ovne, hvor den i stedet kunne have været brugt på sagens kerne, nemlig selve udvindingsforsøgene.



Her ses den fortolkning af Espevej / Skovmark ovnen, jeg har benyttet til mine seneste forsøg. Udformningen er ikke historisk korrekt i alle detaljer, men den er blevet valgt for at give ovnen den simpleste mulige opbygning. Ovnen har især den fordel, at slaggen tappes ud af ovnsiden, hvilket gør det muligt at studere slaggen under selve forsøget. I bunden af ovnen ses en ambolt-sten, der gør det muligt at smede den varme jernluppe med en stolpe, før den tages ud af ovnen.



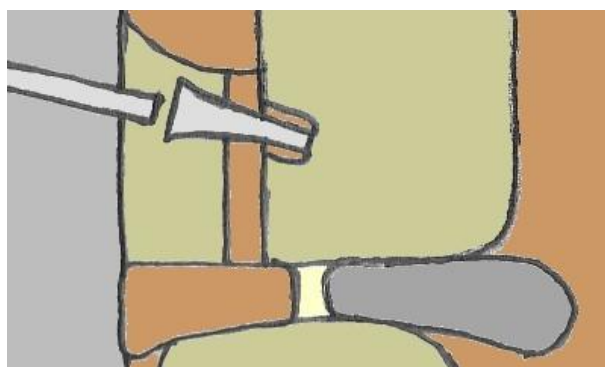
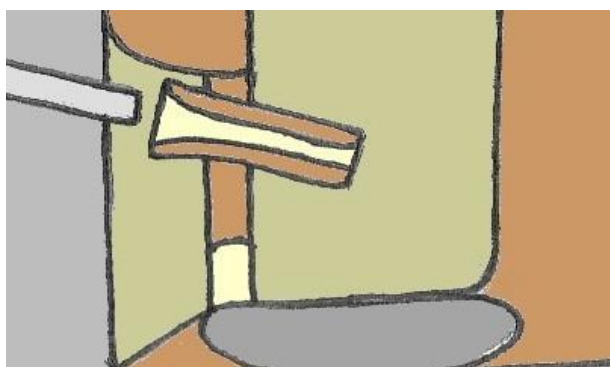
Jernudvinding på Ribe Vikingecenter i skolernes efterårsferie 2004.

Her ses ovn-anlægget i funktion. Blæsebælgen er forskudt ud til den ene side for at gøre plads til arbejdet foran ovnen.

Den ovnkonstruktion, jeg for det meste anvender i dag, er formet som en lodret cylinder med en højde på 80-90 cm og en indre diameter på 25-30 cm. Ovnens er nedsænket 40-50 cm under jordoverfladen, og ved siden af ovnen er der gravet en arbejds-grube med samme dybde. Ovnvæggens tykkelse kan variere noget men er nederst som regel 20-30 cm og øverst 10-15 cm. Nederst i ovnvæggen er der en åbning på ca. 25 * 25 cm ud mod arbejdsgruben. Denne åbning er under selve jernudvindingen lukket med en 5 cm tyk lerplade, den såkaldte dyseplade.

I dysepladen indsætter jeg altid en lerdyse med det formål at kunne lede indblæsningsluften ind mod midten af ovnen. Jernudvindingsprocessen fungerer tilsyneladende ikke uden denne dyse – Indtil videre er så godt som alle mine forsøg på at få ovnen til at fungere uden lerdyse mislykket. En jernudvindingsovn med kun ét indblæsningshul kan godt fungere uden luftdyse, men kun under den forudsætning, at ovnen ikke er mere end 20-25 cm i diameter. Større ovne vil ikke fungere uden dyse, da den uensartede lufttilførsel gør det vanskeligt at få ovnens indhold til at brænde jævnt.

Der findes enkelte danske arkæologiske vidnesbyrd om brugen af dyser i forbindelse med jernfremstilling, men de er få og små. Interessant er Nielsen (1924), der i sin doktorafhandling beskriver fundet af ca. 100 stærkt forslagede, koniske ”blæsetude” i forbindelse med udgravningen af en jernudvindingsplads i Kjellerup. Nielsen tolker blæsetudene som lerkopper, der har beskyttet den egentlige luftdyse, der antages at have været fremstillet af metal. Eksperimenter har vist, at luftdyser af både kobber og jern kan anvendes til jernfremstilling, uden at disse ødelægges (personlig meddelelse D. Markewitz 8.3.2005). Brugen af metaldyser er dog forbundet med vanskeligheder pga. den høje temperatur og de stærkt oxiderende forhold omkring indblæsningshullet. Dette forhold kunne forklare brugen af de lerkopper, Nielsen beskriver i sin afhandling.



Til venstre ses den lerdyse, jeg normalt benytter til mine udvindingsforsøg. Dysen er noget længere end nødvendigt for at kompensere for afsmeltning. Den er enkel at fremstille og fungerer fint, men der er intet eller meget lidt arkæologisk materiale, der tyder på brugen af sådanne lerdyser. Til højre ses et mere realistisk forslag til, hvordan sådanne dyser kunne have set ud. Dysen er et konisk metalrør af eks. forkobret jern, hvis smalle ende stikker nogle få cm ind i ovnen gennem dysepladen. Metaldysens spids er overstrøget med et tyndt lag ler for at beskytte den mod oxidation. Varmen ledes gennem metallet væk fra spidsen og bagud mod den brede del af dysen, der fungerer som ”kølegitter” og derved forhindrer at dysen ødelægges.

Der findes desuden talrige etnografiske beskrivelser af, hvordan lerdyser har været anvendt i forbindelse med jernfremstilling i afrikanske stammesamfund, hvor man indtil for få årtier siden har udført dette håndværk efter samme principper som i europæisk oldtid (Schmidt 1996). Men da brugen af luftdyser stort set er ignoreret i den mere historisk orienterede del af jernudvindingslitteraturen, vil jeg give dem et ord med på vejen i denne artikel. Jeg vil starte med at stille det enkle spørgsmål: Hvorfor benytte en luftdyse?

Hvis man blot indblæser luften gennem et lille hul i dysepladen, sådan som det almindeligvis antages, at man har gjort i forbindelse med brugen af Skovmark- og Espevej-ovnen, opstår der let to problemer. Først og fremmest bliver ovnen så varm over og omkring indblæsningshullet, at lervæggen meget ofte vil smelte til en tyktflydende, sej slagge, der løber ned mod ovnbunden.

Undervejs sætter denne slagge sig som en forstyrrende prop over indblæsningshullet og slagge-aftapningshullet, hvilket gør det meget vanskeligt at gennemføre et jernudvindingsforsøg. Problemet skyldes, at luften altid vil følge den korteste eller letteste rute ud af ovnen, hvilket typisk er lodret op langs den del af ovnskaktens væg, der er over indblæsningshullet. Problemet løser ikke sig selv; frontlugen og ovnvæggen vil blive ved med at smelte, indtil de er tæret væk.

Desuden vil den sirupsagtige lerslagge ofte blande sig med jernudvindingsslaggen, hvilket hæver dens smeltepunkt betydeligt og gør den vanskelig at holde flydende. Denne slagge vil ofte sætte sig som en halvstørknet prop omkring slaggeaftapningshullet.

Dertil kommer, at ovnens bageste del – altså den del, der er længst væk fra indblæsningshullet – ikke bliver opvarmet tilstrækkeligt, fordi luftstrømmen ikke når denne del af ovnen. Konsekvensen er, at jernudvindingsprocessen ikke forløber som den skal. I stedet ophobes store mængder myremalm og størknet slagge bagest i ovnbunden, hvilket er til stor skade for udvindingsprocessen.

Begge problemer løses ved at lade en dyse føre luftstrømmen ind mod midten af ovnen. Den velfungerende dyse, jeg har eksperimenteret mig frem til, består af en lerblanding, der er stærkt magret med sand eller chamotte – stentøjsler fungerer rigtig godt men er næppe historisk korrekt. Dysen har form som en langstrakt cylinder med en længde på ca. 25 cm og en ydre diameter på 6-7 cm. Luftkanalen gennem dysen har en diameter på 2,5-3 cm. Under jernudvindingsforsøget vil lerdysen langsomt smelte bort og dryppe ned mod slaggehullet, hvor lerslaggerne kan fjernes uden besvær. Et jernudvindingsforsøg strækker sig oftest over 6-8 timer, og i løbet af denne tid smelter dysen stort set væk. Tilbage er kun en stub, der som regel knuses under åbning af ovnen. Enkelte gange efterlader luftdysen en karakteristisk ring af smeltet ler som eneste bevis på sin tilstedeværelse.



Her ses råmaterialerne til den lerblanding, vi i dag anvender til jernudvindingsovnene.

Fra venstre mod højre: Sand, hestemøg, rødler og nederst græs. Bemærk at ingredienserne ikke er vist i det rette mængdeforhold.

I løbet af de seks sæsoner, jeg indtil videre har arbejdet med eksperimentel jernudvinding på Ribe vikingecenter, har der været rig lejlighed til også at eksperimentere med forskellige lerblandinger. De første ovne var bygget udelukkende af rent rødler, og det stod meget hurtigt klart, at det ikke ville fungere. Ovnene revnede fra top til tå, og i et enkelt tilfælde måtte ovnen vikles ind i reb for at forhindre den i at falde fra hinanden.

I dag anvender jeg en mager og meget varmestabil blanding bestående af omtrent lige dele sand og rødler samt 1-3 % strå og hestemøg. Tallene skal ikke forstås helt bogstaveligt, de er kun vejledende, det er i høj grad en vurderingssag at fremstille en god lerblanding. Det kommer bl.a. an på, hvor tørt leret er. Det kan især være svært at afveje de to sidstnævnte ingredienser, men man opnår et godt resultat, hvis man til en 80-100 kg lerblanding tilsætter ca. en halv spand hestemøg og

en god favnfuld tørt græs. Blandingen skal være så fast, at den holder formen under opbygning af ovnen, men samtidig så klistret, at sammenføjningerne hænger ved hinanden. Lerblandingen må ikke være hverken smattet eller tør.

Halm og hestemøg holder effektivt sammen på konstruktionen og gør ovnen ufølsom over for store temperaturforandringer over kort tid. Hvis man anvender den beskrevne lerblanding, kan det lade sig gøre at tørre ovnen med ild, så snart den er færdig, stort set uden at den revner. Samtidig øges lerets isoleringsevne af det høje indhold af organisk materiale. Blandingen har også vist sig at være meget vejrbestandig: Den ovn, som ses på nedenstående fotografi, havde, på det tidspunkt fotografiet blev taget, stået i 1½ år og havde indtil da været flittigt anvendt gennem to sæsoner.



Fotoet er taget under et jernudvindings-træf i skolernes efterårsferie 2002.

Ovnen på fotoet var meget god at arbejde med. Den var kun ca. 25 cm i diameter og 80 cm høj. Lerblandingen var meget vejrbestandig pga. dens indhold af hestemøg og strå.

Når man bygger en jernudvindingsovn, er det vigtigt at gøre sig nogle overvejelser omkring vind og vejr, inden man stikker spaden i jorden. På grund af den flamme, der brænder over jernudvindingsovnen mens forsøget står på, bør man først og fremmest undgå at bygge ovnen et sted, hvor der kan forekomme kastevinde eller turbulens pga. bygninger og lignende. Selv foretrækker jeg en let brise, der leder ovnflammen væk fra arbejdsgruben. Vindstille vejr er også godt men kan resultere i nedfald af varmt malmstøv omkring ovnen, hvis der benyttes en særlig fin myremalm.

Man bør også gøre sig nogle tanker om vandet – både det, der kommer fra oven og det, der kommer nedefra; jeg har forsøgsvis valgt at bygge et ovnanlæg på en flad mark ca. 100 meter fra en lille å. Trods afstanden stod der konstant en håndsbredde vand i bunden af arbejdsgruben, hvilket selvfølgelig gav en del problemer i forbindelse med jernudvindingsforsøgene. Problemet blev ”løst” ved at grave en dræn-brønd ved siden af ovnen og siden tømme denne med få timers mellemrum, så længe eksperimenterne stod på. Den rigtige løsning havde naturligvis været at undersøge vandstanden *inden* ovnanlægget blev bygget. Regnvand kan også give en del problemer, hvis man bygger sit ovnanlæg i leret jord. Sørg for at dræne eller overdække området, så arbejdsgruben ikke bliver til en gulfiskedam.

Når man har fundet et godt sted at bygge, starter man med at afmærke hvor arbejdsgruben og ovnsakten skal være. Derefter graver man græstørvane op og stabler dem et stykke fra arbejdsgruben – De skal senere bruges til at afstive og beskytte ovnen, når den er bygget færdig. Derefter graver man arbejdsgruben og hullet til ovnsakten. Begge dele skal være 30-50 cm dybe alt efter omstændighederne. Det næste, der skal gøres, er at anlægge et plant område lige ved siden af ovnen, hvor man kan blande ler. Området strøs over med et lag sand. Laget skal dække evt. græs og planter helt, så de ikke senere hænger ved lerblandingen og gør den vanskelig at skovle op. Leret

læsses af ovenpå sandet og bredes med fødderne ud til en tyk ”pandekage”. Derefter fordeles sand, møg og strå i et jævnt, tyndt lag, som æltes sammen med leret. Når stakken er trådt helt ud, skovles den sammen til en høj bunke igen, bunken trædes atter ud til en pandekage, der tilsættes mere sand, møg og halm osv. osv. indtil alle materialerne er æltet grundigt sammen. Undervejs tilsættes vand efter behov. Med denne metode kan to mand uden stort besvær ælte 80-100 kg ler på under en time. Hvis man ikke vil anvende blandingen med det samme, kan man dække den færdige lerdynge til med vådt halm eller hø, så holder den sig i månedsvis.



Jernudvindings-træf på Ribe Vikingecenter i skolernes efterårsferie 2003.

I forgrunden ses lerblandepladsen. I baggrunden ses arbejdsgruben og hullet til ovnen. Fra stendynge til højre udvælges et par gode marksten til ovnens fundament. Længst væk se de opstablede tørv, der senere vil blive stablet op omkring ovnen.

Nu kan byggeriet begynde. Det er en god idé at bygge ovnens fundament op af marksten. På den måde sparer man en hel del ler, da ovnvæggen er tykkest forneden. Jeg bygger gerne rammen omkring dysepladen op med store, aflange marksten, hvis det er muligt. Det giver en klart afgrænset, holdbar åbning i ovnen. I øvrigt er ovnbyggeriet stort set uproblematisk – som regel kan man bygge en komplet ovn op på få timer. I modsætning til skaktovne, der er bygget oven på jorden, vil den nedgravede ovn stort set ikke synke sammen under opbygningen, hvilket letter arbejdet ganske betydeligt.



Her ses ovnens fundament umiddelbart før og efter opbygning af ovnskakten. Marksten danner en stabil ramme omkring dysepladen. De to mindre sten støtter dysepladen og markerer samtidig slaggeaftapningshullet. Bagest i ovnen ses den flade ambolt-sten, på hvilken man kan smede luppen. Bemærk, at det ikke er strengt nødvendigt at bygge ovnen således. Mulighederne er mange. Det bør især nævnes, at amboltstenen kan have en afkølede og dermed skadelig virkning på forsøget, hvis den er meget stor.

Så snart ovnskakten er bygget færdig og er skrabet jævn og glat indvendig, tørres den med et lille bål i bunden af ovnen, der holdes ved lige en dags tid eller to, alt afhængig af vejret. Begynd først at lappe revnerne, når ovnen er helt tør. Når ovnen står færdig, kan man dække den til med græstørv. Det er en udmærket løsning at grave ovnen ca. to tredjedele ned i jorden og dække den øverste tredjedel af med græstørv.



Færdigbygget ovn. Forberedelse til Jernudvinding på vikingemarkedet i Terp, Maj 2004. Det absolut nemmeste er at grave ovnen ind i en lille skrænt eller forhøjning i landskabet.

Jernudvindingsforsøget, der foregik i løbet af vikingemarkedet, resulterede i en smedbar jernluppe på 5 kg.

Jernudvindingsprocessen

I forbindelse med eksperimentel jernudvinding kan man drage stor nytte af at vide lidt om, hvordan jernudvindingsprocessen fungerer. Det er desuden en meget fascinerende proces, der forløber inde i ovnen under en jernudvinding. Dens enkelte dele griber ind i hinanden på en intim og smuk facon, der giver jernudvindingsprocessen en vis lighed med de processer, der foregår i en levende organisme. I det følgende vil jeg prøve at give en overordnet beskrivelse af disse processer, med fokus på de særlig vigtige aspekter, man bør være opmærksom på under et jernudvindingsforsøg. For at gøre beskrivelsen forståelig for flest mulig læsere, har jeg valgt at holde sproget i en hverdagsagtig tone samt ikke at inkludere kemiske formler. En mere nøjagtig beskrivelse af de enkelte processer vil kunne læses i den færdige rapport, og desuden findes processerne naturligvis beskrevet i talrige andre artikler og bøger om samme eller lignende emner. Jernudvindingsprocessen kan groft opdeles i 4 væsentlige dele, der alle skal styres og afvejes i forhold til hinanden:

1. Omdannelse af jernoxider til metallisk jern.
2. Dannelse af en hensigtsmæssig slagge.
3. Styling af jernets kulstof-optagelse.
4. Sammensintrig af jernpartikler til en kompakt luppe.

Jeg vil starte min beskrivelse af jernudvindingsprocessen ved at fortælle om forbrænding af kulstof, da denne proces danner hele grundlaget for jernudvindingen. Det kulstof, der forbrændes (i form af trækul), leverer både den store mængde varme, der gør det muligt for processen at forløbe, og den kulilte-gas, der kræves for at omdanne jernoxid til metallisk jern. Desuden er det tilstedeværelsen af kulstof, der gør det muligt at omdanne det bløde jern til hårdt stål.

Kulilte dannes for det meste nederst i ovnen, hvor der er varmest. Kulilten er stabil ved høje temperaturer, men højere oppe i ovnen, hvor der er mindre varmt, vil den forbinde sig med ilt og danne kuldioxid. Atmosfæren inde i ovnen er meget iltfattig, fordi de glødende kul effektivt

forbrænder ilten, så langt størstedelen af kulilten vil passere gennem ovnen uden at omdannes til kuldioxid. Men da kulilte er en meget reaktionsdygtig eller kemisk ”aggressiv” forbindelse, er den også i stand til at forbinde sig med ilt, der allerede indgår i andre kemiske forbindelser – for eksempel jernoxid. Jernoxid er en meget stabil forbindelse, fordi jern og ilt er bundet stærkt til hinanden, men kulilte er så reaktionsdygtigt, at det kan splitte jernforbindelserne og i stedet danne kuldioxid og metallisk jern. Denne proces kræver store mængder energi i form af varme. Processen forløber fint omkring 900-1200°C, dvs. når kullene er tydeligt glødende. Ved lavere temperaturer forløber processen slet ikke eller kun så langsomt, at den ikke har nogen praktisk betydning. Omdannelsen fra jernoxid til metallisk jern sker ikke øjeblikkelig, den tager tid. Fra det øjeblik malmen er opvarmet til ca. 900°C, går der omkring en time, før der er blevet omdannet tilstrækkeligt meget jernoxid til metallisk jern. Hvis malmen kun har været opvarmet i kortere tid, når processen ikke at forløbe længe nok til, at der kan dannes acceptable mængder jern.

Det er meget vigtigt, at man er opmærksom på de ovennævnte to forhold, når man forbereder og udfører et jernudvindingsforsøg. Husk, at ovnen kun arbejder så længe dens indhold er glødende varmt. Hvis ovnen kun er varm i bunden, vil der ikke komme jern ud af alle anstrengelserne. Som tommelfinger-regel skal ovns indhold være glødende ca. 50 cm over luftindblæsningen (Tylecote *et al.* 1971). På den måde sikrer man sig, at der er tilstrækkeligt varmt til, at processen kan forløbe, og at malmen samtidig holdes opvarmet tilstrækkeligt længe til, at der kommer rigeligt med jern ud af forsøget. Dette er jernudvindingens Alfa og Omega – husk det.

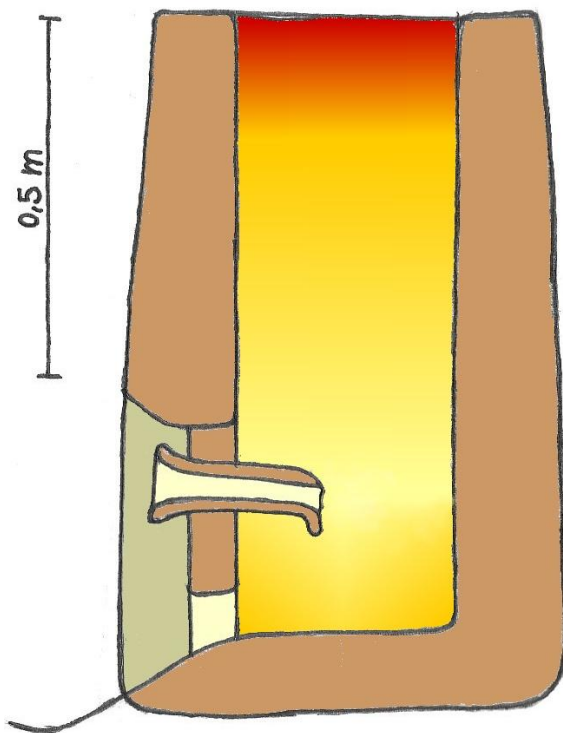
Det sker ofte, at ovnen ikke bliver varm nok, fordi man lader slagge-aftapningshullet stå åbent hele tiden, så slaggen ikke sætter sig fast i bunden af ovnen. Det er en meget alvorlig fejl. I samme øjeblik man åbner for slaggehullet, vil luften undslippe den vej i stedet for at arbejde sig op gennem ovnen. Det får hurtigt den konsekvens, at den øverste del af ovnen afkøles, og dermed bremses udvindingsprocessen. I værste fald når den øverste del af ovnen slet ikke at blive varm; kullene er kun glødende i den allernederste del af ovnen. Resultatet bliver, at malmen og kullene passerer uforandret gennem ovnen og først bliver opvarmet lige inden de når bunden, hvilket medfører dannelsen af meget tung, jernoxid-holdig slagge men intet jern. Husk derfor altid at lukke slaggehullet efter aftapning. En stump græstørv eller en skovfuld fugtig jord er godt til formålet.

En anden almindelig grund til, at ovnen ikke bliver varm er, at man ikke gør sig tilstrækkelig umage med at forvarme ovnen, før jernudvindingen påbegyndes. Det tager tid for varmen at arbejde sig op gennem ovnen; en jernudvindingsovn skal helst forvarmes 1-2 timer, før den er varm nok. Det er meget vigtigt, at kullene er glødende hele vejen op gennem ovnskaften, før man begynder at fylde malm på - det kan ikke nævnes for ofte!

En jernudvindingsovn kan desuden være vanskelig at opvarme, hvis den er for bred. Man må huske på, at ovns diameter har stor betydning for dens rumfang; en 85 cm høj ovn med en lysning på 25 cm har et rumfang på knap 42 l, hvorimod en tilsvarende ovn med en lysning på 28 cm har et rumfang på lidt over 52 l. Det er en forskel i rumfang på 20-25 % (afhængigt af hvilken ovn man benytter som udgangspunkt), men forskellen kan næppe skelnes med det blotte øje. Problemet er, at det er den tilførte luftmængdes størrelse, der bestemmer hvor stort et volumen kul, der bringes til at gløde. Men det er ovns form, der afgør om dette volumen bliver bredt og lavt eller smalt og højt. To tilsyneladende ens ovne kan altså reagere forskelligt under de samme kontrollerede forhold.

I ovnen dannes jern som et meget finkornet pulver – nærmest atom for atom. Et sådant pulver er meget sårbart over for udefra kommende påvirkninger, hvilket skyldes dets meget store overfladeareal. Hvis der bare er den mindste smule ilt til stede sammen med jernet, vil det straks brænde til jernoxid igen. Til sammenligning har en massiv jernklods et ringe overfladeareal i forhold til sin vægt og vil derfor ikke tage megen skade ved kontakt med ilt. Det ser man i forbindelse med smedearbejde; jernet overtrækkes med et lag jernoxid, men ødelægges ikke. Et fint jernpulver ville brænde væk øjeblikkelig under de samme omstændigheder.

Det samme gør sig gældende under mere hverdagsagtige forhold. Hvis man lader et fint jernpulver ligge ubeskyttet uden døre eller et andet sted med iltrig, fugtig luft, vil det begynde at ruste øjeblikkeligt. I løbet af få døgn vil det være helt omdannet til rust. En jernbaneskinne rustner på samme måde, men fordi dens overfladeareal er så ringe i forhold til vægten, vil det tage århundreder eller årtusinder, før den er tæret bort.



◀ I toppen af ovnen er temperaturen kun nogle få hundrede grader. Malm og kul opvarmes, men der sker ingen reduktion.

◀ Kullene er blevet antændt, og malmen er opvarmet til 800-1000°C. Reduktionen er påbegyndt og bliver stadig kraftigere, jo længere malmen synker ned i ovnen.

◀ I midten af ovnen er temperaturen 1000-1200°C. Kraftig reduktion. Slaggen dannes og begynder at løbe ned mod ovnbunden. Jernkorn opslættes i slaggen, hvorved de beskyttes mod kulstof-optagelse og mod den iltrige atmosfære i bunden af ovnen.

◀ Lige omkring luftdysen er temperaturen 1200-1300°C. Miljøet er meget heterogent, atmosfæren veksler konstant mellem at være stærkt reducerende og oxiderende. Uden en beskyttende slaggehinde vil jernkornene straks forbrænde til jernoxid eller optage store mængder kulstof.

◀ I bunden af ovnen samles jernkorn og allerede dannede jernklumper til en sammenhængende luppe. Temperaturen er 1200-900°C. Luppen overstrømmes af slagge, der danner en sø i bunden af ovnen. Slaggens jernforbindelser hæmmer luppens kulstof-optagelse.

Heldigvis er forholdene inde i jernudvindingsovnen meget gunstige, når det gælder om at beskytte de fine jernpartikler mod ilt. Der er stort set iltfrit i ovnens øverste del, hvor jernpartiklerne dannes, det sørger kullene og kulilte-gassen for. Men jernpartiklerne er også sårbare overfor andre påvirkninger, for eksempel overfor de store mængder kulstof, der er i ovnen. Ved høje temperaturer vil der altid diffundere små mængder kulstof ind i jernet, og ved temperaturer under ca. 600°C vil dette kulstof forbinde sig kemisk med jernet og danne stoffet jerncarbide eller *cementit*. Det er en meget hård og sprød forbindelse, der sammen med blødt jern eller *ferrit* danner det, vi i daglig tale kalder stål. Jo mere cementit, der er i stålet, jo mere hårdt og sprødt bliver det. Problemet er, at der kun skal blandes ganske lidt kulstof i jernet for at danne godt stål. Typisk indeholder stål mellem ca. 0,3 % og 0,8 % kulstof. Hvis kulstofindholdet overstiger ca. 1 % bliver det så sprødt, at det ikke kan bruges til noget. På grund af den høje temperatur og de meget store mængder kulstof i ovnen, ville alt jernet hurtigt blive overmættet med kulstof, hvis det ikke blev beskyttet. Resultatet ville blive et materiale, der var så sprødt og skørt som keramik, og som ikke kunne smedes. Dvs. et materiale, der minder om støbejern eller råjern.

Men her træder slaggen til og rækker en hjælpende hånd. Under jernudvindingen dannes der altid en del slagge. Denne slagge består først og fremmest af jernoxid og siliciumdioxid i form af kvarts-sand. Jernoxid og kvarts vil under høje temperaturer altid forbinde sig og danne stoffet fayalit. En ren fayalit-slagge smelter ved ca. 1200°C, hvilket svarer til den temperatur, der er i den nederste del af jernudvindingsovnen. Når slaggen smelter, bliver de fine jernpartikler opslæmmet i den og transporteret ned mod bunden af ovnen. Slaggen opløser også alt det jernoxid, der ikke er blevet omdannet til metallisk jern.

Så længe jernpartiklerne er opslæmmet i den flydende slagge, er de godt beskyttet mod påvirkninger udefra. Slaggen danner en beskyttende hinde, der forhindrer at jern og ilt mødes og

danner jernoxid. Det er især vigtigt, når slaggen løber gennem ovnens nederste del, hvor luften blæses ind. Her er der stadig megen ilt i ovnens atmosfære, og hvis ikke jernet var omgivet af den beskyttende slagge, ville det øjeblikkeligt brænde væk.

Slaggen beskytter også de fine jernpartikler mod at optage for meget kulstof. Det skyldes, at slaggen indeholder et overskud af jernoxid. Når kulstof trænger ind i den flydende slagge, vil det først og fremmest reagere med den jernoxid, der er i slaggen og danne kulilte og metallisk jern. Hvis slaggen var fattig på jernoxid, ville den ikke beskytte jernet nær så effektivt, og så ville der i stedet dannes meget cementit.

Når de utallige jernpartikler er blevet opslæmmet i slaggen, begynder de at forbinde sig med hinanden til jernkrystaller. Krystallerne vokser hurtigt, og snart begynder de at vokse sammen til egentlige jernklumper. Når slaggen har nået ovnbunden, er jernklumperne blevet så store, at de bundfældes og begynder at danne en jernluppe. Slaggen løber videre mod aftapningshullet og ud af ovnen. Denne proces kan kun ske, hvis jernpartiklerne er opslæmmet i slaggen. Uden slagge ville der ikke dannes en jernluppe. Selvom det er nærliggende at betragte slaggen som et overflødigt spildprodukt, er slaggen i virkeligheden en meget vigtig faktor i jernudvindingsprocessen.

Gennem mine forsøg har jeg opdaget, at slaggen i høj grad ”sladrer” om, hvordan jernudvindingsprocessen forløber. Mængden af slagge og slaggens farve, vægt og konsistens fortæller meget om processerne inde i ovnen, der jo er vanskelige at observere direkte. Ved at undersøge slaggen, efter at den er blevet tappet ud af ovnen, kan man opdage eventuelle problemer og gøre noget ved dem med det samme – endnu mens udvindingsforsøget er i gang. Men det kræver, at man forstår slaggens ”sprog”. Det vil jeg fortælle lidt om.

Jernudvinding handler i bund og grund om at omdanne mest muligt af myremalmens jernoxid til metallisk jern og bagefter smelte resten af malmen væk i form af slagge. Hvis udvindingen kører godt og man udvinder meget jern, må slaggen derfor nødvendigvis være fattig på jernoxid. Og omvendt; hvis udvindingen ikke kører særlig godt, vil der være meget jernoxid til overs i slaggen. Dette forudsætter naturligvis, at man benytter en god, jernrig myremalm! Det handler med andre ord om at lære at se forskellen mellem en jern*fattig* og en jern*rig* slagge. Forskellen mellem en god og en dårlig jernudvinding ses tydeligt på slaggen – der kræves intet avanceret måleudstyr for at bedømme slaggens indhold af jernoxid. Det eneste man behøver at gøre, er at vente til den tappede slagge er blevet kold og derefter slå den i stykker. Vælg et stort stykke fra. Vej det i hånden og studér det grundigt, både brudfladen og overfladen. Slaggen kan groft opdeles i 4 forskellige typer, her ordnet efter deres indhold af jernforbindelser:

(1) Den jernrige slagge, der ofte optræder under et mislykket jernudvindingsforsøg:

-Slaggen er meget tung. Den har malmvægt, dvs. en vægtfylde på ca. 5 g/cm^3 eller derover.

-Overfladen har en mat, mørkegrå farve.

-Brudfladen er kornet og har kraftig metalglans. Farven veksler mellem skinnende gråhvid, blålig og lys korngul.

-Slaggen er meget tyndtflydende. Den opfører sig som smeltet stearin. Den størkner hurtigt efter aftapning.

-Slaggen er tydeligt magnetisk, hvilket tyder på et højt indhold af jernoxider.



Denne slagge optræder ofte i forbindelse med mislykkede jernudvindingsforsøg. Slaggen består af fayalit med et overskud af jernoxider, og den dannes, når der udvindes lidt eller slet intet jern af malmen. Slaggen kan knuses til granulat og genanvendes ved et senere jernudvindingsforsøg. Store mængder af denne slagge er et udpræget dårligt tegn. Slaggen opstår meget ofte fordi ovnen indhold ikke er tilstrækkeligt opvarmet, altså fordi kullene og malmen kun gløder i bunden af ovnen men ikke højere oppe i ovnsakten. Problemet løses ved at mindske ovnens volumen ved at gøre den smallere, eller ved at benytte en større blæsebælg. Det bør dog nævnes, at det er et godt tegn, hvis der udelukkende dannes små mængder af denne slagge under et udvindingsforsøg (højest ca. 3 kg pr. 30 kg malm). Det tyder på, at malmen er af særlig god kvalitet.

(2) Den grågrønne slagge, der optræder under et nogenlunde vellykket jernudvindingsforsøg:

-Slaggens vægtfylde ligger et sted mellem malmvægt og stenvægt, dvs. omkring 4 g/cm^3 .

-Overfladen er ubestemmelig grå.

-Brudfladen er ”sten-agtig” mat og kornet, af og til med nåleformede krystaller. Farven veksler mellem lys grå, grågrøn og beige.

-Slaggen er svagt magnetisk.



Denne slagge kan optræde i flere forskellige former. Ved højere jernindhold får slaggen metalglans, ved lavere jernindhold får den glasglans og et lysere, mere gråligt udseende. Alt efter afkølingshastigheden dannes der mere eller mindre veludviklede krystaller, hvilket bevirker, at slagger med samme kemiske sammensætning kan se forskellige ud. Slaggen tyder som regel på et rimeligt godt udbytte og god jernkvalitet. Jeg *formoder*, at denne slagge har en sammensætning, der ligger nær fayalit.

(3) Den sorte glasslagge, der optræder under et meget vellykket jernudvindingsforsøg:

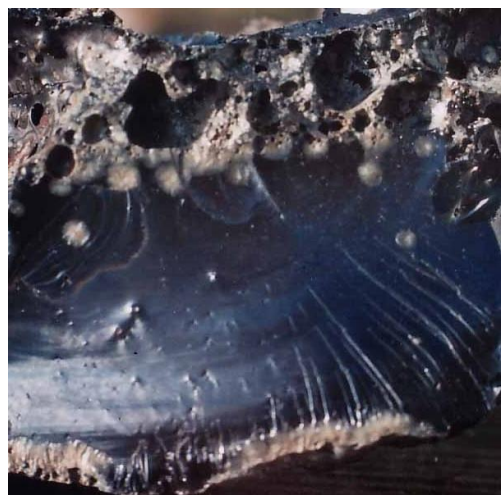
-Slaggen har stenvægt, dvs. en vægtfylde på ca. 3 g/cm^3 eller derunder.

-Overfladen er grå, af og til med svag glasglans.

-Brudfladen er karakteristisk muslet som knust glas eller flint. Farven er mørk grønbrun, næsten sort.

-Slaggen er viskos i smeltet tilstand, dvs. den opfører sig som smeltet glas eller varm bolsje-masse. Den størkner langsomt efter aftapning.

-Slaggen er stort set umagnetisk.



Denne slagge ledsages ofte af den ovenfor beskrevne grågrønne, krystallinske slagge, hvilket også ses på fotoet. Slaggens glasagtige udseende skyldes, at den er rig på kvarts. Den mørke farve

skyldes jernforbindelser (en glasslagges farve vil blive stadig lysere grønlig med faldende jernindhold). Denne slagge opstår altid under særligt vellykkede jernudvindingsforsøg, men på grund af det lave jernindhold formår slaggen ikke i nær så høj grad at beskytte jernet mod kulstofoptagelse, som den mere jernrige slagge. Man kan modvirke dette problem ved kun at tappe slaggen, når det er absolut nødvendigt, dvs. hvis den løber ind i luftdysen, eller hvis der er overhængende fare for, at den størkner inde i ovnen. På den måde sikrer man sig, at luppen til stadighed er dækket af slagge.

(4) Den jernfattige grønne glasslagge, der ofte optræder under et mislykket jernudvindingsforsøg:

-Slaggen er meget let pga. gasbobler og lavt jernindhold.

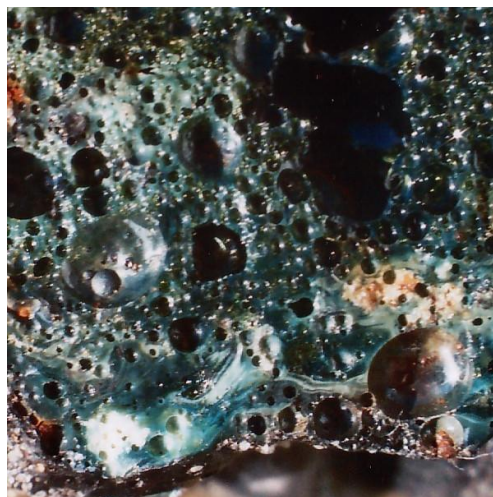
-Overfladen skinner med glasglans.

-Brudfladen er som knust glas.

-Slaggen er meget viskos i smeltet tilstand. Den kan være vanskelig at tappe og størkner langsomt efter aftapning.

-Slaggen indeholder mange gasbobler, hvilket giver den et opskummet udseende. Den indeholder ofte jernperler.

-Slaggen er fuldkommen umagnetisk.



Denne slagge tyder altid på et stort jern-udbytte. Men som for den sorte glasslagge gælder der, at den pga. et meget lavt indhold af jernoxid ikke beskytter luppen særlig effektivt mod at optage kulstof. Man kan altså sagtens risikere at få en stor jernluppe, der ikke kan smedes, fordi den er for hård og sprød. Den grønne glasagtige slagge er altså oftest et dårligt tegn, selvom den opstår i forbindelse med et stort jern-udbytte. Desuden kan den meget viskose slagge være svær at tappe ud af ovnen, da den har en meget større tendens til at sætte sig fast i ovnbunden end mere jernrige, tyndtflydende slagger. En tyktflydende slagge medfører også det problem, at jernkornene har vanskeligt ved at bundfælde inde i ovnen og i stedet ledes ud af ovnen sammen med slaggen. Slaggens høje viskositet skyldes, at en lidt for stor andel af de tilgængelige jernforbindelser omdannes til metallisk jern. Problemet kan modvirkes ved at blæse mindre luft ind i ovnen, og på sigt løses problemet ved at bygge ovnen en anelse bredere.

Men slaggernes udseende alene fortæller ikke alt om, hvordan jernudvindingsforsøget forløber. Man bør samtidig være meget opmærksom på *mængden* af slagge i forhold til den malm-mængde, der fyldes på ovnen. Dannelsen af store mængder slagge er altid et dårligt tegn; hvis der opstår et kilo slagge for hvert kilo malm, man fylder på ovnen, er der tydeligvis ét eller andet galt. Som tommelfingerregel bør slaggen højst veje ca. en tredjedel af den malm, der er anvendt under jernudvindingsforsøget. Eksempelvis bør der ikke dannes mere end højst ca. 10 kg slagge ved et malmforbrug på ca. 30 kg.

Hvis der dannes større mængder jernfattig slagge, tyder det på, at malmen har et for lavt indhold af jernforbindelser. Det betyder ikke nødvendigvis, at man ikke kan fremstille jern af denne malm, man skal bare ikke forvente noget særligt stort udbytte af sine anstrengelser. Hvis der omvendt dannes større mængder jernrig slagge under et udvindingsforsøg, tyder det på, at selve forsøget ikke kører, som det skal. Typisk er ovnen ikke tilstrækkeligt opvarmet, som beskrevet ovenfor.

Til slut vil jeg gerne skrive et par ord om slaggens smeltepunkt. I teksten ovenfor har jeg nævnt, at den typiske fayalitslagge har et smeltepunkt på mindst ca. 1200°C afhængig af sammensætningen. Det samme kan man læse i en lang række andre artikler og bøger omhandlende eksperimentel jernudvinding. Enkelte steder anføres fayalits smeltepunkt så lavt som til ca. 1100°C, men kun i forbindelse med brug af kalk som flusmiddel (Joosten *et al.* 1997), hvilket højest sandsynligt ikke har været brugt i oldtiden. Det tages generelt for givet, at jernudvindingsslaggens smeltepunkt som et absolut minimum ligger på omkring 1150°C. Desuden lægges der i den mere teoretiske del af jernudvindings-litteraturen vægt på, at slaggen skal have et ret højt indhold af jernforbindelser, for at kunne smelte ved denne temperatur – omkring 70 % jernoxid og kun 30 % kvarts – og at et lavere jernindhold end dette altid medfører et højere smeltepunkt.

Men jeg vil dog vove den påstand, at der er tale om en sandhed med modifikationer. Jernudvindingsslagge kan godt flyde ved betydeligt lavere temperaturer end 1200°C, og under de rette forhold flyder den uden problemer ved ca. 1000°C. Dette ses på nedenstående fotografi, der er taget under et vellykket jernudvindingsforsøg i sommeren 2000.



Her ses en glasagtig slagge løbe ned i slaggerummet under ovnen.

Slaggen løber jævnt og roligt, som halvt smeltet glas. Bemærk slaggens farve. Temperaturen er 800-900°C. Slaggen *kan* godt tappes ved sådanne lave temperaturer, men den er noget mere behagelig at arbejde med ved omkring 1000-1200°C.

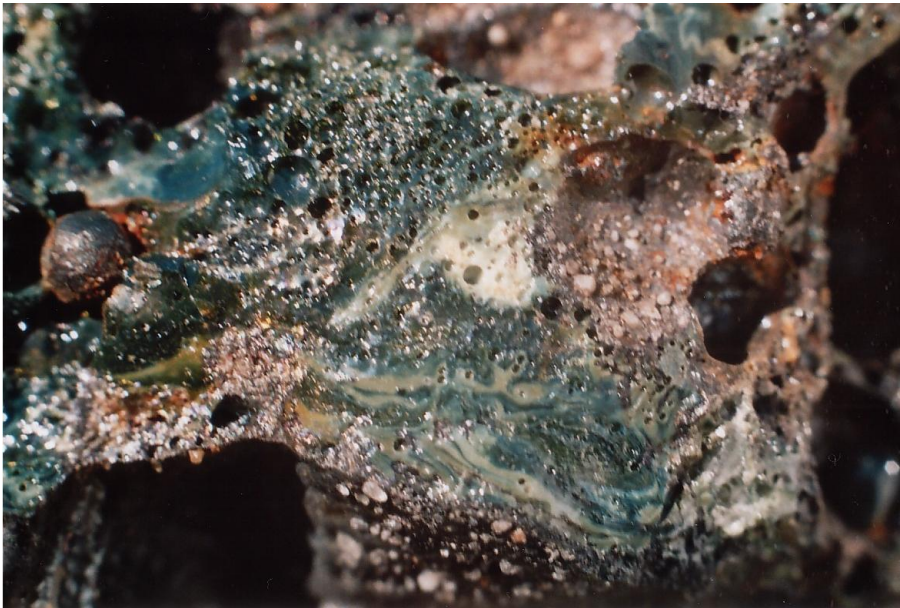
Der kan ikke herske nogen tvivl om, at den flydende slagge, der ses som en rødglødende stribe i slaggerummets venstre side, har en betydeligt lavere temperatur end 1200°C. Det kan være vanskeligt at bedømme farver på et fotografi, men i dette tilfælde kan man sammenligne slaggens farve direkte med farven på den flamme, der står ud af slaggerummet: Hvis slaggens temperatur var blot i nærheden af 1200°C, ville den lyse meget klarere end flammen, på helt samme måde som et stykke jern ved svejsevarme lyser meget klarere end flammerne over essen. Dette foto dokumenterer blot ét af de ganske mange af mine jernudvindingsforsøg, hvor slaggen tydeligvis flød ud af ovnen ved en lavere temperatur end 1200°C. Det skal dog bemærkes, at slaggen under langt de fleste af mine udvindingsforsøg *har* været omkring 1200°C ved aftapningen, uanset dens evne til at flyde ved lavere temperaturer. Billedet ovenfor viser altså ikke en typisk jernudvindings-situation, men blot at slaggen under de rette betingelser *kan* tappes ved ganske lave temperaturer.

Forklaringen på dette fænomen er ganske enkelt, at den jernfattige glasslagge, man ser på fotoet, har en anden kemisk sammensætning, end den typiske jernudvindingsslagge, og dermed også andre fysiske egenskaber. De slagge, man finder i forbindelse med udgravninger af jernudvindings-pladser, består som regel af fayalit med et overskud af jernforbindelser. Denne jernrige slagge har ganske rigtigt et smeltepunkt på omkring 1200°C, og hvis den afkøles til en lavere temperatur, vil den hurtigt udkrystalliseres og størkne. Det forholder sig noget anderledes med en mere jernfattig

slagge, som den man ser på fotoet. Hvis indholdet af jernforbindelser bliver tilstrækkeligt lavt, mister slaggen sin evne til at krystallisere ved en bestemt temperatur. Slaggen er med andre ord blevet et amorft materiale; den er blevet en form for glas.

En af de egenskaber, der karakteriserer amorfe stoffer er, at de ikke har et klart defineret smeltepunkt, sådan som eks. metallerne og deres legeringer. Under opvarmning bliver et amorft stof mere og mere blødt, og på et tidspunkt flyder det så let, at vi definerer det som smeltet. Eks. smelter almindeligt glas pr. definition først ved 1400-1500°C, men det er i realiteten *flydende* ved betydeligt lavere temperaturer. På samme måde forholder det sig med den jernfattige fayalitslagge.

Altså kort og godt: Selvom slaggens smeltepunkt teoretisk set stiger med faldende jernindhold, så har den meget jernfattige slagge alligevel i realiteten et lavere "smeltepunkt", fordi den er amorf og ikke krystallinsk som de mere jernrige slagger.



Her ses en karakteristisk blågrøn glasslagge i 3,5 ganges forstørrelse. Den brune farve skyldes rustdannelse. Bemærk den meget heterogene sammensætning, der tydeligt ses i glassets vekslende farvespil. Yderst til venstre ses en kuglerund jernperle.

Det er almindeligt at finde små mængder glasfase i oldtidens jernudvindingsslagger (Hjärthner-Holdar 1997), men i forbindelse med mine forsøg har jeg ofte oplevet, at slaggen bestod næsten udelukkende af et glasagtigt materiale. Der er flere tydelige karakteristika, der peger i den retning: Den afkølede slagge har tydelig glasglans, og brudfladen har ligeledes glasglans og er ofte muslet og rillet, ganske som knust glas. Desuden er slaggen blød og formbar, så længe den er glødende; den kan strækkes, snos og trækkes ud i tynde tråde. Slaggen har altid en karakteristisk grønlig eller sort farve – enkelte slagger har smukke turkisblå, olivenfarvede eller gulgrønne nuancer.

Grunden til, at ovennævnte glasslagge er særlig jernfattig, skyldes at den anvendte jernudvindingsmetode er meget effektiv. Når en forholdsvis stor del af myremalmens jernforbindelser tilbageholdes i ovnen som metallisk jern, vil den resterende slagge naturligvis være meget jernfattig. Som oftest opstår denne slagge i forbindelse med dannelsen af store, kompakte jernlupper. For så vidt er dannelsen af en glasagtig slagge et godt tegn.

Der er dog især to alvorlige ulemper ved at tilstræbe en meget jernfattig slagge. Først og fremmest kan en jernfattig slagge ikke beskytte luppen særlig effektivt mod kulstofoptagelse, hvilket medfører dannelsen af sprødt, skørt højkulstof-stål, der ikke kan bearbejdes. Dette kan – i hvert fald teoretisk – modvirkes ved at sænke temperaturen i ovnen til et absolut minimum. Kulstofoptagelse kan også hæmmes ved at konstruere ovnen sådan, at jernluppen ligger nedsænket i et slagge-bad, der holdes flydende gennem en særlig kraftig opvarmning af ovenbunden. De to metoder er altså modsatrettede og derfor desværre uforenelige. Indtil videre er det kun delvist lykkedes mig at styre disse processer i praksis, men især sidstnævnte har udvist et stort potentiale og bliver anvendt med succes af Lee Sauder og Skip Williams (u.å).

Desuden bevirker den mere tyktflydende glasslagge, at de jernkorn, der er opslæmmet i slaggen, har en ringere tendens til at samles og bundfælde i ovnbunden, hvilket hæmmer dannelsen af en kompakt luppe. I stedet følger en stor del af jernpartiklerne med slaggen ud under aftapningen. Jeg har dog kun for alvor oplevet det problem i forbindelse med en særlig tyktflydende lerholdig slagge, der dannes, hvis dele af oven smelter eller opløses i slaggen under udvindingen.

Det store spørgsmål er nu: Har man nogensinde fundet sådanne slagger i forbindelse med udgravninger af jernudvindingsanlæg? Så vidt jeg kan forstå på den tilgængelige litteratur, har man aldrig fundet grønne eller sorte glasagtige jernslagger her i landet, men jeg har af flere kolleger ladet mig fortælle, at sådanne slagger er fundet - både herhjemme og andetsteds i Skandinavien (Personlig meddelelse K. Nyborg 21.07.04 og S. Vælds 13.10.04). Problemet er, at slaggen ikke *ligner* en typisk jernudvindingsslagge og derfor måske ikke bliver genkendt som en sådan, når den opdages under en udgravning. Slagjerne har ofte klare, smukke farver og kunne derfor måske fejltolkes som glasrester fra en nedbrændt bygning eller affald fra glasarbejde. Farverne kunne også under et hastigt gennemsyn fejltolkes som tegn på tilstedeværelsen af kobber, der under borttæring danner salte med grønne og blå farver. Siden kan gravemaskiner eller bondens plov have revet slagjerne ud af deres sammenhæng, hvilket vanskeliggør tolkning.



Her ses en sort glasslagge i 2 ganges forstørrelse. Bemærk den tydelige glasglans og det karakteristiske muslede brud, der minder om knust glas eller flint. Den sorte farve skyldes, at slaggen har et højere indhold af jern og/eller mangan end den grønne slagge.

Kortfattet vejledning i jernudvinding

Hermed har jeg forsøgt at koge mine erfaringer ned til en enkel ”bageopskrift”, der kan bruges uafhængigt af resten af artiklen. Kun de vigtigste ting er taget med, opskriften er altså beskrivende og vejledende men ikke *forklarende*. God arbejdslyst.

1. **Find en god myremalm.** Gode malme er altid fri for sand og sten! Jo flere okkerforbindelser, jo bedre. God malm er rødbrun eller gullig, evt. med blålige skinnende felter. Undgå sorte eller mørkegrå malme, de indeholder mangan. Undgå malme, der lugter af svovl. Vægtfylde spiller ingen rolle – en tung malm kan være dårlig, en let kan være god. God malm kan både være et fint pulver eller hårde klumper. En magnet kan ikke bruges til at teste malmens jernindhold – rå myremalm er næsten altid umagnetisk.
2. **Rist malmen grundigt på et glødebål.** Alt vand skal drives ud af malmen. Under ristningen bliver hårde malmklumper porøse, så de let kan knuses. Malmens jernforbindelser omdannes fra jernhydroxid til hæmatit og magnetit – det sparer ovnen for et energikrævende

- stykke arbejde. Under ristningen fordamper malmens svovlforbindelser – det forbedrer jernets kvalitet. Malmen blandes med aske, der virker som flusmiddel – det giver en mere tyndtflydende slagge.
3. **Lerblanding.** Brug aldrig rent ler – ovnen vil revne og smuldre. Brug aldrig kalkholdigt ler eller mergel – ovnen vil smelte, når den bliver varm. Brug ca. lige dele ler og sand – blandingen skal være fast og klistret, hverken tør eller smattet. Bland gerne en smule møg fra køer, får eller heste i leret – det gør ovnen stærkere. Bland også en smule halm eller hø i leret – stråene må højst være ca. 15 cm lange. Bland leret grundigt, der må ikke være klumper eller sandlommer.
 4. **Byg en god ovn.** Skakten bør ikke være for stor – indvendigt 25-30 cm bred og 85-90 cm høj. Byg en solid ovn, der kan holde til flere udvindinger. Brug altid en luftdyse til at lede luften ind i midten af ovnen – det er meget vigtigt! Dysen laves af magret ler – placér den 15 cm over ovnbunden og med spidsen midt i ovnen. Sørg for godt med arbejdsplads foran ovnen. Brug gerne marksten til at bygge med – jo flere sten, jo mindre ler. Tør ovnen med ild, straks den er bygget færdig. Begynd først at lappe revner, når ovnen er helt tør. Dæk den færdige ovn af med græstørv – det beskytter mod vind og vejr.
 5. **Før jernudvindingen:** Sørg for at montere bælgen grundigt før udvindingen starter – når udvindingen er i gang, er det for sent at rette fejl. Brug hellere en blæsebælg, der er for stor, end én, der er for lille. Knus malmen til granulat eller pulver – kom aldrig store klumper i ovnen. Hav altid forskelligt værktøj klar til at fjerne størknet slagge fra ovnbunden og luftdysen – en almindelig pind er ofte det bedste værktøj. Forvarm ovnen med almindeligt brænde eller affaldstræ. Læg evt. en jernplade over ovnen, så varmen ikke undslipper. Sørg altid for at forvarme ovnen grundigt – kullene skal gløde tydeligt helt oppe i toppen af ovnen, før der må hældes malm på. Fyr med trækul ca. ½ time før jernudvindingen starter.
 6. **Under jernudvindingen:** Lav aldrig jernudvindingsforsøg i varmt, tørt vejr – gør det i fugtigt eller køligt vejr. Blæs luft ind i ovnen hele tiden! Brug vægtmæssigt lige dele trækul og malm, gerne lidt mere malm. Brug ikke for store kul, så drysser malmen igennem – blandede kul mellem 0,5 og 6 cm er gode. Hele ovnens indhold skal være glødende – også i toppen af ovnen. Hold ovnen fuld til randen hele tiden. Brug ikke for store portioner – max. ca. 2 kg malm ad gangen, gerne mindre. Kig ned i ovnen en gang i mellem – brænder kullene jævnt? Hvis ikke, kan det skyldes at dysen er for kort, eller at ovnen er for bred. Hold godt øje med slaggen – den må ikke sætte sig fast i bunden af ovnen eller foran luftdysen. Men pas på: Slaggen beskytter jernet, så den må heller ikke tappes for ofte. Luk altid slaggehullet grundigt efter aftapning – der må ikke stå flammer ud fra ovnens bund, kun fra toppen. Knus et slaggestykke hver gang I har tappet og kig på brudfladen – glasagtig sort eller grøn slagge betyder meget jern af vekslende kvalitet; stenagtig grålig slagge betyder rimelige mængder jern af god kvalitet; tung eller metallisk skinnende blålig slagge betyder intet jern. For meget varme ødelægger jernet – varm kun så meget, at slaggen flyder.
 7. **Rensning af jernluppen.** Brug altid kun sideblæst esse – aldrig bundblæst. Lufthullet må ikke sidde helt nede ved bunden af essen – der skal være plads til at slaggen kan lægge sig i bunden af essen, uden at lufthullet blokeres. Brug kun trækul – luppen vil optage svovl fra stenkul, og det ødelægger jernet. Tænd op i essen, læg luppen i og dæk den helt med trækul. Varm luppen op til svejsevarme – den skal vendes og drejes tit. Luppen skal hele tiden være dækket med glødende kul. Luk for luften og lyt til essen i ny og næ – når det syder, løber slaggen fra jernet. Luppen må ikke synke ned i bunden af essen – den skal være omgivet af glødende kul på alle sider. Smed kun luppen ved eller lige under svejsevarme. Slå først forsigtigt på luppen, siden hårdere – brug altid en tung hammer. Smed en firkantet stang og fold den 2-3 gange, så er jernet klar til brug. Den færdige jernstang vil som regel have en vægt på mellem $\frac{2}{3}$ og $\frac{1}{2}$ af luppens oprindelige vægt før udsmedning.

Referenceliste:

- Hjärthner-Holdar, E., Kresten, P. & Larsson, L. (1997): From known to unknown. Application of well-known experimental iron production results on archaeological materials.
I: Nørbach, L. (ed.) (1997): *Early iron production –archaeology, technology and experiments*. Technical Report Nr. 3., Lejre.
- Joosten, I., Jansen, B. & Kars, H., (1997): The use of a model to describe bloomery production in the Netherlands. I: Nørbach, L. (ed.) (1997): *Early iron production –archaeology, technology and experiments*. Technical Report Nr. 3., Lejre.
- Nielsen, N. (1924): *Studier over Jærnproduktionen i Jylland*. Arnold Buscks boghandel, København.
- Nissen, M. S., (2005): *Jern til husbehov*. (unpublished).
- Sauder, L. & Williams, S. (u.å.): *A Practical Treatise on the Smelting and Smithing of Bloomery Iron* (unpublished).
- Schmidt, P. R. (ed.) (1996): *The culture and technology of african iron production*. University press of Florida, Gainesville.
- Tylecote, R. F., Austin, J. N. & Wraith, A. E. (1971): The mechanism of the bloomery process in shaft furnaces. I: (1971): *Journal of the iron and steel institute*.
- Voss, O. (2004): *The archaeology of iron smelting in Denmark. International conference Archaeo-metallurgy in Europe*. Associazione Italiana di Metallurgia.

I forbindelse med spørgsmål eller kommentarer kontakt forfatteren:

Michael S. Nissen,
Rejsby Landevej 8, 1. sal,
6780 Skærbæk

Tlf: 73 75 52 77
Mobil: 20 66 28 32
Mail: micha3l_niss3n@yahoo.dk

Hjemmeside om jernudvinding under opbygning (forventes færdig i løbet af 2005):
<http://jernmager.users.whitehat.dk>