

20. METALLURGISKE UNDERSØGELSER

Arne Jouttijärvi¹

Formålet med denne artikel er at give en baggrund for forståelse af de metoder, som er anvendt ved de arkæometallurgiske analyser, hvorfra resultater bruges i kapitlerne om Fangberget og Ånestad (hhv. 14 og 10 i denne bogen). De metodemæssige beskrivelser er relativt kortfattede og går ikke i dybden med den grundlæggende kemi, men er også kun ment som en hjælp for læsere uden væsentlig indsigt i kemi og metallurgi til at forså de analyser og overvejelser, som ligger til grund for tolkningerne.

Metallurgiske undersøgelser er ikke blot én type analyser, men omfatter flere forskellige måder at undersøge og analysere materialer på, som enten er metaller eller har forbindelse til udvinding eller forarbejdning af metaller. Der kan således være tale om analyse af metalgenstande, slagger, smeltet ler og aske, malme eller teknisk keramik som digler eller fragmenter af ovne eller esser. Ved analyserne kan derfor anvendes en række forskellige analysemetoder, og de kan vælges ud fra de arkæologiske eller teknologihistoriske spørgsmål, man på forhånd har stillet til materialet.

Når man undersøger spor efter jernudvinding eller smedning, er det primære materiale oftest slaggerne. De kan give mange oplysninger om processerne, valget af malm og de fortidige håndværkeres viden og kunnen. Der findes dog også andre former for affald som eksempelvis: hammerskæl, slaggekugler, små jernfragmenter, malm og forglasset ler, som kan give væsentlige oplysninger, og i mange tilfælde viden, som man ikke kan få fra slaggerne, og som kan nuancere det billede, man i sidste ende får af, hvad der foregik på en jernudvindingsplads eller i et værksted.

20.1 FRA MALM TIL JERNGENSTAND

I de tilfælde, som beskrives i denne bog, drejer det sig udelukkende om udvinding og smedning af jern. Selve udvindingsprocessen og udviklingen af ovntyperne i Europa har været grundigt undersøgt både arkæologisk (Pleiner 2000, Espelund 2008, Larsen 2009), teoretisk

(Espelund 2003, Thiele & Dévényi 2013) og gennem eksperimentelle udvindinger (Thiele 2010).

Man skelner overordnet mellem to forskellige jernudvindingsprocesser: den direkte og den indirekte. Den indirekte er den, man bruger i nutidens højovne, hvor jernet fremstilles som smeltet støbejern (råjern) og derefter bliver rensset for kulstof ved en raffinering, så resultatet bliver kulstoffattigt smedejern. I jernalderen og op til middelalderen blev der anvendt en anden proces, hvor jernet i ovnene blev dannet som en svampet masse af fast jern (en luppe), som oftest havde meget lavt indhold af kulstof. Processen har fået navnet: den direkte proces, fordi der direkte laves jern, som kan smedes, uden at det behøver gennemgå en raffinering.

Råmaterialet for jernudvindingen var oftest myremalm, som kan have et meget højt indhold af jern i form af jernoxid (Buchwald 1998). Malmen indeholder dog også kvarts og lerminerale, som skal fjernes fra det dannede jern, før det kan smedes.

Udvindingen foregik i en lav skaktovn af ler, og brændslet var trækul. I ovnen vil trækullet brænde med et underskud af luft, og der dannes derfor en atmosfære med et underskud af ilt (oksygen) (reducerende atmosfære), som reducerer jernoxiderne i malmen til metallisk jern. Da temperaturen i ovnen ikke er høj nok til at smelte jernet, dannes det som en svampet masse af fast jern. En stor del af jernoxiderne vil dog ikke blive omdannet til metal; men vil, sammen med kvarts og lerminerale, smelte og danne en slagge, som kan løbe ud af jernsvampen. Slaggen tjener dermed det formål, at den adskiller jernet fra de uønskede minerale i malmen. Prisen er dog en ineffektiv proces, hvor slaggen stadig kan indeholde 50–60 % jernoxid.

Resultatet af processen har været en luppe, som stadig kunne indeholde en stor andel af slagge, i nogle tilfælde helt op til 50 % (Pleiner 2003, Buchwald 2005). For at jernet kunne smedes til genstande, var det nødvendigt, at slaggen først blev rensset ud. Det skete ved primærsmedningen, hvor stykker af luppen opvarmedes kraftigt i en esse, så slaggen smeltede og

¹ Heimdal-archaeometry, Danmark.

løb ud af porositeterne i jernet og størknede som en kompakt slagge i bunden af essen. Disse slagger har tydelig form efter bunden af essen og betegnes ofte som plankonvekse eller kalotformede.

Luppen vil oftest bestå af næsten rent jern, men kan indeholde mindre eller større områder, hvor indholdet af kulstof er så højt, at der er tale om stål (ca. 0,3-0,8 % C). I forbindelse med primærsmedningen kan smeden sortere stålet fra, så det kan anvendes, hvor der er brug for et hårdt og stærkt materiale, typisk i skærende ægge på knive og andet værktøj.

Til slut blev jernet smedet til genstande ved sekundærsmedningen, som enten kunne bestå af en simpel formning af søm eller beslag eller være mere avanceret og omfatte sammensvejsning af flere stykker jern og stål. Selve jernet indeholdt færre forureninger end moderne jern og var derfor relativt blødt og nemt at smede; men til gengæld medførte et ofte ganske stort indhold af slaggeindeslutninger, at styrken af både jern og stål var lavere, end det er for jern med tilsvarende kulstofindhold i dag (Thiele & Hošek 2015).

20.2 SLAGGER

Når det gælder udvindingen, er slaggerne ofte den primære kilde. Slagger er ikke blot et affaldsprodukt af jernudvindingen, men har også spillet en afgørende rolle i selve processen. På baggrund af slaggerens udseende og struktur kan man ofte få et indtryk af, hvilken proces og, for udvindingsslagger, hvilken ovntype de kommer fra. Der er også arbejdet med at lave systematiske typologier for slagger fra forskellige processer (Sperl 1980, McDonnell 1986). Ofte kan der dog være tale om relativt små fragmenter, og så vil det være nødvendigt også at se på slaggens kemiske sammensætning og indre struktur (Serneels 1993, Gordon 1997, Serneels & Perret 2003, Soullignac & Serneels 2014). Da malme, og dermed slagger, vil variere meget i sammensætning afhængigt af den lokale geologi, vil det være svært at give en universel vejledning. Inden for et snævrere geografisk område vil der derimod være sket systematiske ændringer i slaggerens sammensætning i de forskellige procestrin, og det er derfor muligt med rimelig sikkerhed at afgøre, hvilken proces en slagge er opstået ved.

20.2.1 Udseende og morfologi

Jernudvindingen i Norges jernalder og middelalder inddeles i to faser: Fase I, som strækker sig fra førromersk jernalder og op til ca. år 700 AD, og Fase II, som varer fra ca. 700 til ca. 1300. Ovne fra fase I er kendetegnet ved, at slaggen løber ned i en grube under

ovnen; mens man i Fase II har tappet slaggen ud af en åbning i siden af ovnen. I begge faser kan ovnene have haft forskellig størrelse og udseende, og der er derfor defineret en række lokale ovntyper (Larsen 2009), som i nogen grad afspejler sig i slaggerens form og sammensætning.

Ved jernudvindingen dannes ofte mere end 100 kg slagge, og store slaggeblokke vil derfor, alene på grund af deres størrelse, kunne identificeres som slagger fra udvinding. I Norge er der dog kun ovne af Østlandstypen, som er kendt for store slaggeblokke (Larsen 2013). I de fleste andre ovntyper er slaggerne blevet brudt op i mindre stykker, enten fordi de er blevet brudt op og smidt i en slaggedynge efter udvindingen (Som f.eks. Trøndelagsovnen), eller fordi de i sig selv har en dårlig sammenhæng (som for eksempel i ovne af Eg typen). Hvis fragmenterne er store nok, vil der dog ofte være andre karakteristiske træk.

Slagger med tydelige lodrette løbestrukturer og nedhængende dråber (slaggen løber uden om tidligere størknet slagge på alle sider) vil næsten altid stamme fra en fase I ovn med slaggegrube, mens slagge med en vandret løbestruktur (slaggen løber over tidligere slagge i lag, og der er ofte en tydeligt markeret bund) kommer fra en Fase II ovn med aftapning. Også en anden ting vil ofte karakterisere de to ovntyper, idet slagger fra Fase I ovne i de fleste tilfælde vil være umagnetiske eller kun svagt magnetiske, mens slagger fra Fase II ovne vil være magnetiske, i det mindste på oversiden.

Grunden til denne forskel er, at magnetisk slagge dannes, når den har mulighed for at reagere med luftens ilt under størkningen. Ved denne oxidation dannes der magnetiske jernoxider. Anderledes forholder det sig, hvis der er et underskud af ilt omkring slaggen (reducerende atmosfære), som det er tilfældet i lukkede ovnrums og slaggegruber. I det tilfælde vil den størknedede jernoxid være umagnetisk. Slaggerne kan dog lokalt blive kraftigt magnetiske, hvis der findes metallisk jern i dem.

Af samme grund er også slagger fra smedeesser oftest magnetiske og kraftigst i den side, som har vendt mod blæsebælgen. Hvis der er mere end små fragmenter af dem bevaret, kan smedeslaggerne også kendes på deres form, som de har fået efter essens bund. Af denne grund kaldes esseslagger, specielt fra primærsmedning, ofte plankonvekse eller kalotformede slagger.

Der er forskel på slagger opstået ved primærsmedning (rensning) af luppejern og esseslagger opstået ved sekundærsmedning (formning) af genstande. Ved primærsmedning dannes slaggerne først og fremmest af udvindingsslagge, som sidder på ydersiden af eller i hulrum i luppen. Der er derfor meget slagge, som samler sig i bunden af essen. Smedeslaggerne fra

primærsmedning bliver derfor tunge og kompakte og har den samme sortgrå farve som udvindingsslagge.

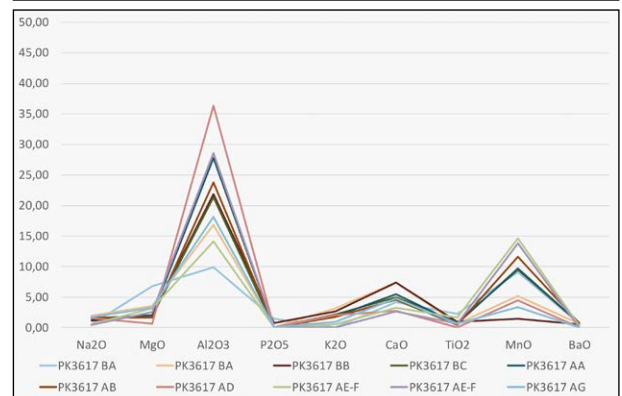
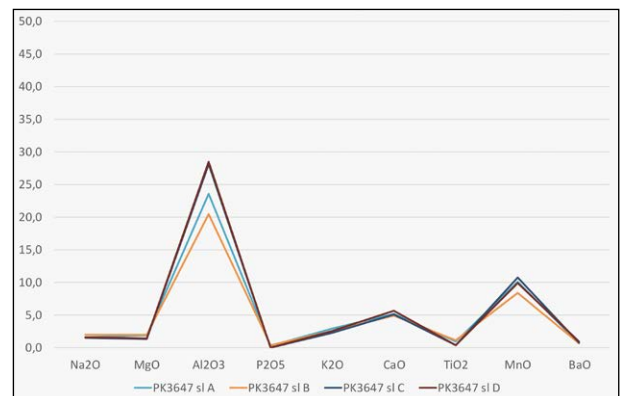
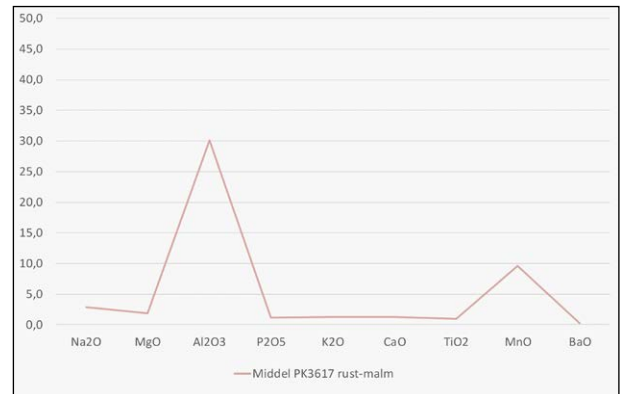
Ved sekundærsmedning er der kun lidt slagge tilbage i jernet, og esseslaggen vil derfor bestå af en blanding af smeltet ler fra essen, mindre mængder slagge, hammerskæl, aske fra trækullet og eventuelt sand, som er blevet drysset på som flusmiddel ved svejsning. På grund af gasser fra asken og det smeltede ler vil slaggen ofte have mange gasbobler og dermed være ret porøs. Hvis den indeholder meget smeltet ler, vil den have store partier af, eller helt være, glasagtig med en grøn eller sort farve.

20.2.2 Kemisk sammensætning

Skønt udvindingslagge og slagge fra primærsmedning kan se ensartet ud, vil analyser dog ofte vise en relativt stor variation. En væsentlig grund til, at slaggerne ser ud til at variere meget i sammensætning, er, at deres indhold af jernoxid varierer meget, fordi der sker en kraftigere reduktion nogle steder i ovnen eller på nogle tidspunkter af udvindingsprocessen. Hvis man ønsker at identificere slagge, som hører sammen f.eks. ved at de kommer fra samme brænding, bliver dette besværliggjort af variationen i jernoxid. En måde at komme uden om dette problem på er at omregne analyserne uden jernoxiden. Herved kigger man kun på de andre stoffer, som kommer fra malmen, leret i ovn eller esse og fra asken efter trækullet. Disse stoffer som siliciumoxid (SiO_2), aluminiumoxid (Al_2O_3), kaliumoxid (K_2O) og kalciumoxid (CaO).

Det meste af slaggen vil bestå af materiale, som er kommet fra malmen; men der kan dog aldrig knyttes en entydig sammenhæng mellem malm og slagge, fordi sand og lermineraller fra malmen i udvindingsovnen vil smelte sammen med ler fra ovnen og med aske fra trækullet. Der vil dog oftest kunne ses en lighed mellem malm og slagge. Dette er illustreret i figur 20.1, hvor diagrammet øverst viser sammensætningen af malmen, efter at indholdet af jernoxid er fraregnet. Eksemplet stammer fra en jernudvindingsplads med spor efter primærsmedning ved Djupetjønn på Hovden i Bykle, Aust-Agder (Jouttijärvi 2019).

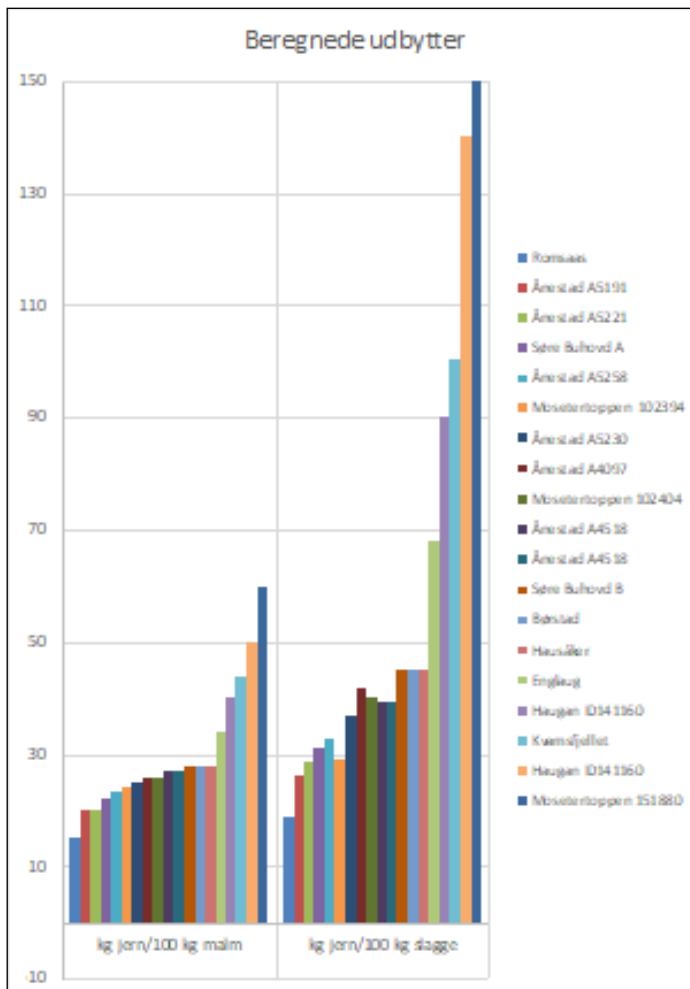
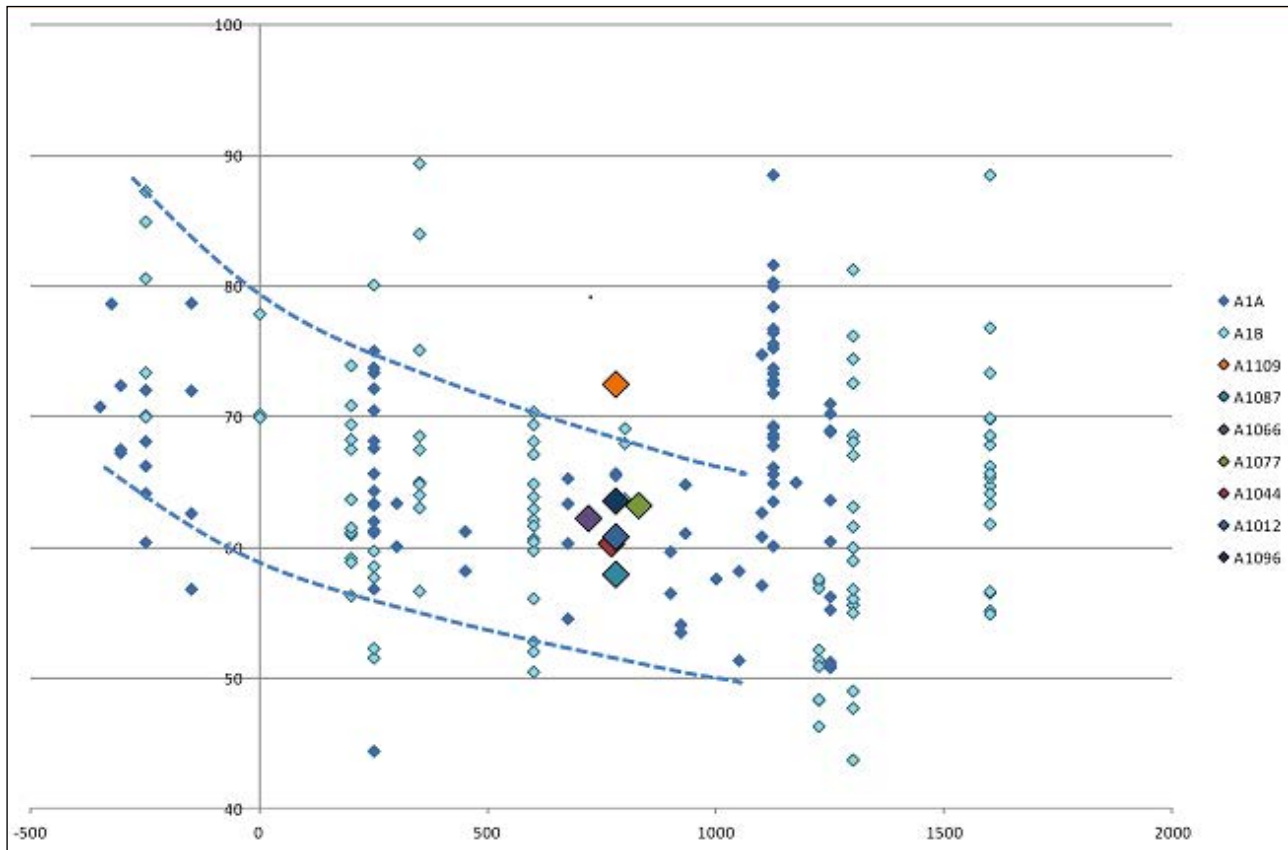
Det kan ses, at malmen har et relativt højt indhold af aluminiumoxid (Al_2O_3) og et mindre, men tydeligt indhold af manganoxid (MnO). Indholdet af de øvrige oxider er relativt små. I midten ses slaggen fra udvindingen, og det kan ses, at indholdet af aluminiumoxid og manganoxid er det samme som i malmen. Til gengæld er der sket en stigning i indholdet af kaliumoxid (K_2O) og kalciumoxid (CaO). Da netop disse to oxider udgør størstedelen af den aske, som dannes ved brænding af trækul, vil et forhøjet



Figur 20.1. Sannemsætning af malm (øverst), udvindingslagge (midt) og hammerskæl fra primærsmedning (nederst). Djupetjønn på Hovden i Bykle, Aust-Agder (Jouttijärvi 2019).

indhold af de to oxider da også være at forvente i slaggen (Crew 2007).

Til nederst ses den kemiske sammensætning af hammerskællene fra primærsmedningen. Skællene vil bestå af udvindingsslagge, som er løbet ud over jernets overflade fra porositeter, og her er størknet, hvorefter de knækker af som flager, når jernet hamres. Som det ses, vil de fleste skæl have sammensætninger, som er næsten identiske med udvindingsslaggen. Da hammerskæl også kan stamme fra andre processer som sekundærsmedning (formning) af genstande og fra svejsning, har nogle af skællene i figur 20.1 afvigende sammensætninger.



Figur 20.2. Til venstre ses resultaterne af en række beregninger foretaget på malm og slagge fra udvindingspladser i Norge. Som det fremgår, er det mest almindelige, at der er blevet fremstillet mellem 20 og 30 kg jern for hver 100 kg malm. Det svarer til mellem 30 og 45 kg jern for hver 100 kg slagge, som blev dannet. Der er dog sket en ændring i udbytte gennem tiden, noget som man kan få et indtryk af på diagrammet til højre. Det viser indholdet af jernoxid i slaggerne set i forhold til deres datering, og jo lavere indholdet er, jo større må man formode, at udbyttet har været. Som det ses, falder slaggenes indhold af jernoxid fra mellem 60 og 80 % i førromersk jernalder til mellem 50 og 65 % i slutningen af vikingetiden. I denne periode er ovnene af Fase I type, altså forskellige udgaver af ovne med slaggegrube. Der kan have været forskel i de forskellige typers effektivitet; men det må formodes, at forbedringen i udbytte først og fremmest må skyldes en udvikling i styringen af processen. Efter ca. år 1000 AD er der pludselig en voldsom forskel i indholdet af jernoxid, som kan variere fra 45 % til 90 %. Det skyldes indførelsen af Fase II ovnene med slaggeaftapning. Her kan det ses, at tapslaggen ofte kan have et meget højt indhold, mens bundskollen, som har ligget længe i den kraftigt reducerende atmosfære inde i ovnen, kan have et meget lavt indhold af jernoxid. (tegning: A. Jouttijärvi).

På denne måde er det muligt at følge processerne fra udvinding til smedning, og de slaggeindeslutninger, som stadig er tilbage i jernet, vil også forventes at have en sammensætning, som er næsten identisk med udvindingsslaggen. Det er derfor, at man kan sandsynliggøre, at nogle af genstandene fra Fangberget er lavet af det jern, som blev rensat ved primærsmedningen i de undersøgte esser (kapitel 14 i denne bogen, Jouttijärvi 2017).

Hvis man ud over slaggen også har rester af malm, som man ofte vil kunne finde i jordprøver fra bunden af udvindingsovne, liggende på jordoverfladen omkring ovnene eller i områder, hvor malmen er blevet ristet eller opbevaret, så vil man kunne lave et skøn over, hvor stort et udbytte man har fået af udvindingen. Det sker ved at sammenligne indholdet af jernoxid i malmen med indholdet i slaggen. Man kan gøre dette på flere måder. Det simpleste er at beregne, hvor meget jern der skal fjernes fra malmen, for at den får et indhold svarende til det, som er i slaggen. På denne måde tager man dog ikke højde for det bidrag, der er kommet til slaggen fra smeltet ler og aske.

En anden, og mere nøjagtig, beregning kan man få, hvis man er sikker på, at det malm man har, stammer fra samme brænding som slaggen. I det tilfælde kan man kigge på den forøgelse, der sker i koncentrationen af stoffer, som må være kommet fra malmen, specielt manganoxid. Ud fra dette kan man beregne hvor meget malm, der er blevet brugt for at danne f.eks. 100 kg slagge. Ved at sammenligne mængden af jern i denne mængde malm med indholdet i slaggen, kan man igen få et tal for udbyttet. Desuden vil man kunne se, hvor meget ler og aske der har bidraget til slaggen.

20.3 JORDPRØVER OG HAMMERSKÆL

Jordprøver er en vigtig kilde til information om de processer, som har foregået på en lokalitet. Når det gælder jernforarbejdning, er det vigtigste deres indhold af hammerskæl og slaggekugler; men der kan også findes små fragmenter af jern, slagge og forglasset ler fra esse eller ovn.

Slaggen fra en esse kan være en blanding af mange forskellige ting, som er samlet, mens essen har været varm. Den kan således bestå af slagge, som er smeltet ud af jernet ved primærsmedningen, af smeltet ler fra essen, af sand eller brændt flint, som er drysset på ved essesvejsning, og af hammerskæl, som er opstået ved oxidation af jernets overflade ved opvarmningen. Det kan derfor være svært at få et klart billede af en smedepoces kun ved analyse af esseslaggerne.

I modsætning til slaggen vil hammerskæl være noget, som er opstået på meget kort tid. De vil derfor

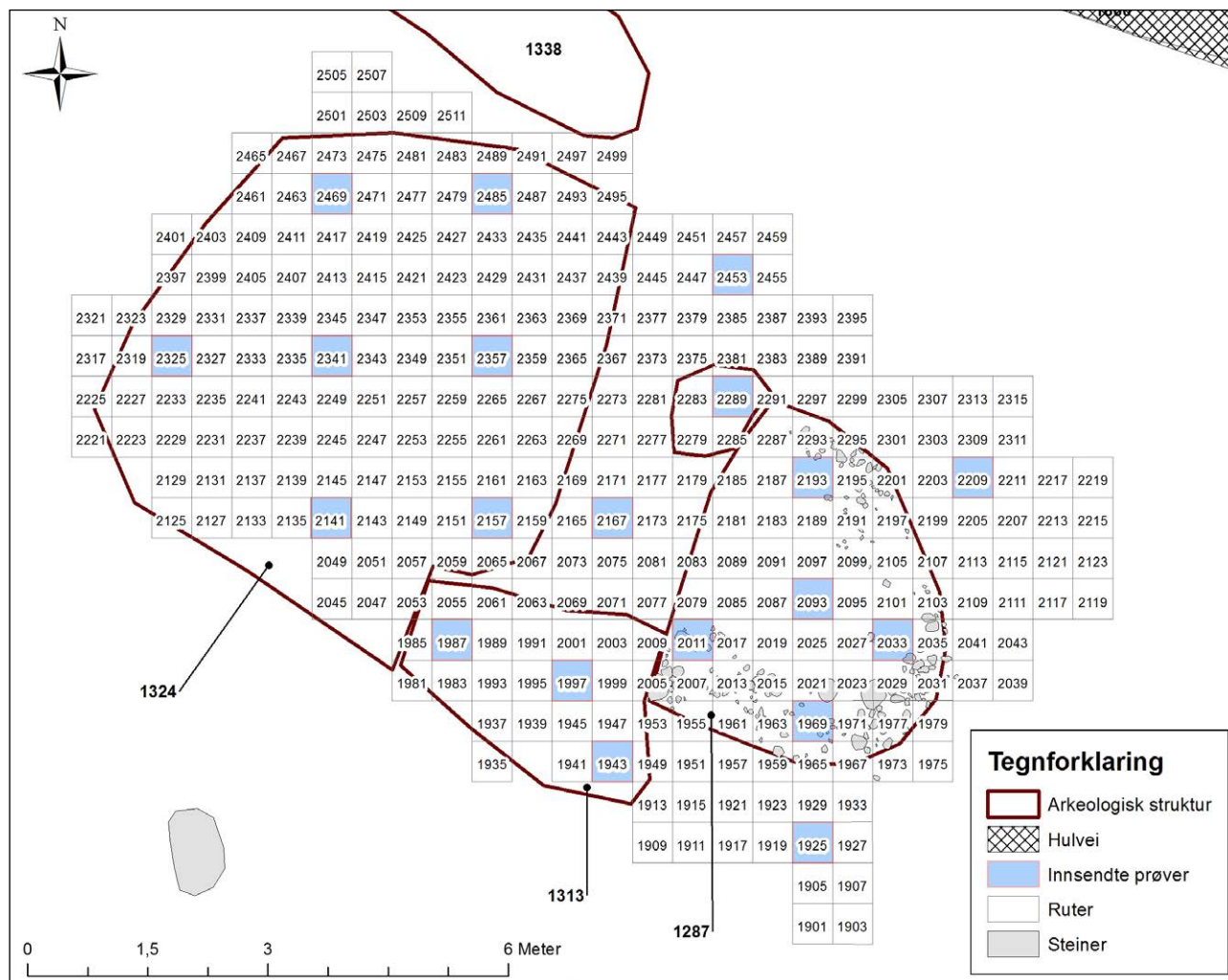
være udtryk for lige præcis den proces, som de blev dannet ved (Dungworth & Wilkes 2009). Ved primærsmedningen vil de bestå af slagge fra udvindingen, som smeltes ud af porositeter af jern og størkner på overfladen. Når der derefter hamres på jernet, springer slaggen af som små skæl. Fra undersøgelser af hammerskæl fra jernudvindingspladser (Jouttijärvi 2017b, Jouttijärvi 2019) ved man, at skællene ofte har en sammensætning, som er næsten identisk med udvindingsslaggen. En given udvinding kan dermed knyttes direkte til sporene efter primærsmedningen af det udvundne jern.

Anderledes forholder det sig ved sekundærsmedningen (formningen) af genstande. På dette tidspunkt vil der kun være små mængder udvindingsslagge tilbage som indeslutninger i jernet. Hammerskæl fra sekundærsmedning dannes derfor primært ved en reaktion mellem jernets overflade og luftens ilt. Ved denne oxidation dannes et tyndt, fast lag af næsten ren jernoxid (glødeskal) på overfladen af jernet. Som for slaggelaget under primærsmedningen vil også glødeskallen ved sekundærsmedningen være sprød og brække af som små flager ved hamring af jernet.

Hammerskæl fra primærsmedning består derfor af slagge, mens skæl fra sekundærsmedning består af jernoxid. De vil derfor have meget forskellig kemisk sammensætning. Samtidig vil hammerskællene fra primærsmedning være tykke og uregelmæssige, mens skæl fra sekundærsmedning er tyndere og glatte. Hammerskæl fra andre processer som svejsning vil igen have en kemisk sammensætning, som afviger fra de andre, og det er derfor muligt at identificere de processer, som er blevet udført i en smedje ved analyse af hammerskæl og slaggekugler (Jouttijärvi 2013, Jouttijärvi 2015).

20.4 SPREDNINGSANALYSE

Ud over at være en kilde til hammerskæl og andet materiale for analyse, kan jordprøver også give oplysninger på en anden måde, nemlig hvis man systematisk tager mange prøver af aktivitetsområder eller funktionslag. Systematisk prøvetagning er endnu ikke almindeligt anvendt, og i de fleste tilfælde sker der ingen analyse udover en vejning af mængden af hammerskæl (Dieudonné-Glad & Conte 2011, Williams, 2012, Veldhuijzen 2010), eller mængden af hammerskæl bliver bedømt ud fra målinger af den magnetiske susceptibilitet (Mills & McDonnell 1992). Ved brug af denne metode skal man dog være opmærksom på, at den magnetiske susceptibilitet også ville blive påvirket af små og større slaggefragmenter samt af naturligt forekommende jernoxid i jorden, som ville



Figur 20.3. Systematisk udtagning af jordprøver i det centrale område på Ånestad I (kapitel 10 i denne bogen, Jouttijärvi 2017 c).

blive magnetisk ved opvarmning, f.eks. under et ildsted. Inden for de seneste år er disse metoder blevet suppleret med in situ analyser ved hjælp af pXRF (Doonan & Mazarakis Ainian 2007, Veldhuijzen 2009). Igen har metoden dog den begrænsning, at man kun ser koncentrationen af jern, men ikke hvilken forbindelse den indgår i. Analyserne af arkæologiske smedjer bliver suppleret af tilsvarende analyser foretaget på eksperimentelle områder for udvinding og smedning (Comeau et al. 2012).

En mere fuldstændig analyse blev benyttet i det centrale område på Ånestad 1, hvor der blev taget mere end 200 jordprøver. Det blev gjort systematisk, som det ses i figur 20.3, hvor hver nummereret firkant repræsenterer en jordprøve. På denne måde kan fordelingen af de forskellige typer smedeaflad, som f.eks. hammerskæl, slaggekugler, slaggefragmenter, forglasset ler og forskellige størrelser trækul kortlægges. Fordelingen kan give oplysninger om værkstedets fysiske indretning, og ved samtidig at se på hvor nedknuste f.eks. trækul eller hammerskæl er,

kan man også se, hvor der har været meget færdsel, og hvor smeden ikke har gået. Det kan betyde, at der har været en fysisk forhindring som f.eks. en væg, at pladsen har været så snæver, at det ikke var muligt at passere eller blot at det ikke har haft noget formål at gå derhen, som det kan være tilfældet i et hjørne.

Det var dog langt fra alle prøver, som blev analyseret, idet der først blev foretaget en screening, ved at de prøver, som er markeret med blå, blev undersøgt. Herved var det muligt at identificere området i midten, området mod syd og området mod øst som områder, der viste tegn på aktivitet. I disse områder blev der derfor udtaget et større antal prøver til analyse. Analyserne viste, at området i midten med stor sandsynlighed havde været et værksted for primærsmedning, som kunne knyttes til den jernudvinding, som havde foregået omkring det (kapitel 10 i denne bogen).

Systematisk prøvetagning kan derfor give oplysninger om, hvor forskellige processer har foregået, og dermed også om den fysiske indretning af værksteder.

I nogle tilfælde vil det endda være muligt at se om værksteder har været omgivet af faste vægge og endda følge den måde, smedene har bevæget sig på inde i værkstedet (Jouttijärvi 2005, Jouttijärvi 2010).

20.5 SMEDETEKNOLOGI

Ved undersøgelse af smedeteknologi er det nødvendigt, at man tager en større prøve af den genstand, som skal undersøges. Hvis det er en kniv, vil man således normalt skære en skive ud på tværs. Typisk vil denne prøve være ca. 2 mm tyk, og hvis genstanden skal bruges til udstilling, eller det af anden årsag er vigtigt at bevare den i ét stykke, kan man nøjes med at lave et snit, som går delvis igennem. Et eksempel på et sådant tværsnit, her af en kniv fra Fangberget (kapitel 14 i denne bogen Jouttijärvi 2017) er vist i figur 20.4.

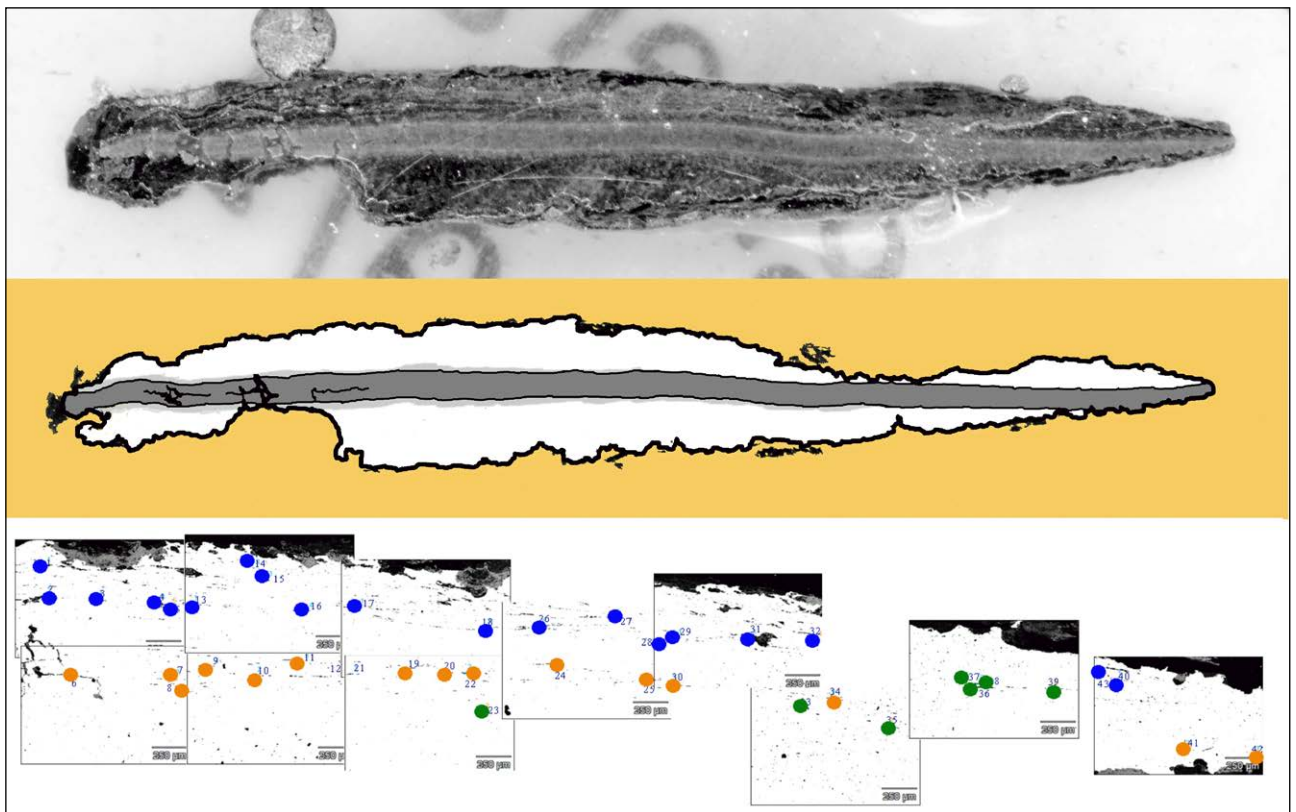
Øverst i figuren ses et foto af tværsnittet, som er blevet indstøbt i epoxy, som er en type plastik, og derefter slebet og poleret, til det er næsten fuldstændigt blankt. Til sidst fremkaldes strukturen, ved at prøven forsigtigt ætzes med en svag opløsning af salpetersyre (HNO_3) i ethanol. Som det kan ses, består knivbladet af tre dele: Et lysere lag, som løber gennem midten fra ryg til æg og på hver side af dette et mørkere område. På billedet i midten af figuren er denne struktur tegnet

op. Her er det midterste lag angivet mørkere, hvilket normalt symboliserer at jernet her har et højt indhold af kulstof (ca. 0,8 %) og derved er stål. Stål kan hærdes ved opvarmning og brat køling i vand og kan blive meget hårdt. Det er derfor velegnet netop til at udgøre den skærende æg i kniven.

Lagene på hver side af stålkerneln består af jern med et meget lavt indhold af kulstof. Det er derfor blødere, men også sejere, og knækker derfor ikke så nemt som stålet. Det kan derfor beskytte stålæggen og forhindre, at kniven knækker, hvis den bliver bøjet eller slået hårdt.

Metallografiske undersøgelser af smedeteknik kan fortælle om den lokale smeds kunnen; men har størst værdi, hvis resultatet af analysen sammenlignes med et større referencemateriale. Herved kan man få oplysninger om, hvor og hvornår teknologiske traditioner er opstået, og hvordan de udbredtes.

Der er i Europa foretaget et meget stort antal metallografiske analyser, hvoraf en væsentlig del er af knive eller sværd, mens en mindre del omfatter andre typer våben og redskaber samt søm, nagler og beslag. I de fleste tilfælde, er der tale om uafhængige analyser med snævert lokalt perspektiv, og der er kun gjort få forsøg på sammenfatning af et større materiale (Pleiner 2006, Lyngstrøm 2008 (metallurgiske



Figur 20.4. Tværsnit af kniv C60529/2 fra Fangberget. På tegningen i midten er stålkerneln (ca 0,7–0,8 % C) markeret med grå farve. Nederst ses de to grupper af slaggeindslutninger markeret med henholdsvis orange/grøn og blå (kapitel 14 i denne bogen, Jouttijärvi 2017 a, se også Figur 20.7).



Figur 20.5. Udbredelsen af forskellige knivtyper i vikingetiden. Indsat to eksempler på variationer af den dominerende knivtype med stållamel i æggen, omgivet af lameller af kulstoffrit jern (tegning: A. Jouttijärvi).

analyser af forfatteren til denne artikel), Tylecote & Gilmour 1996).

Knive er på flere måder en ideel genstand for analyser, hvilket skyldes flere faktorer. Det er således en af de mest udbredte genstandstyper, da næsten alle må formodes at have haft en kniv, uafhængigt af alder og social status. Samtidig er kniven et redskab, som kan fremstilles på mange måder og i meget forskellig kvalitet. Den er derfor et billede på smedens teknologiske kunnen og adgang til forskellige kvaliteter af råmaterialer, og desuden kan knive af høj kvalitet afspejle ejerens sociale status og mulighed for at betale for en dygtig smeds arbejde.

Smedeteknikken, som ses i kniven fra Fangberget, er typisk for vikingetidens knive af høj kvalitet, og vikingerne bragte tydeligvis deres smedeteknik med sig, idet knivtypen kendes fra hele Nordeuropa fra Perm i Rusland i øst (Zavyalov & Terekhova 2014) og til Dublin i vest, som det er illustreret i figur 20.5. Efter vikingetiden forsvinder teknikken dog i det meste af Europa og erstattes af andre måder at kombinere jern og stål på. Tilsyneladende overlever den primært i Norge og Sverige og i Estland (Saage 2013).

20.6 SLAGGEINDESLUTNINGER

Billedet nederst i figur 20.4 viser placeringen af slaggeindeslutninger i jernet, som er blevet analyseret. Farverne på prikkerne viser grupper af slagge med ensartet sammensætning, som er fundet ved multivariabel statistisk analyse af de kemiske analyser. Ved hjælp af en statistisk metode kaldet "clustering" kan man beregne, hvor stor forskellen er mellem de enkelte

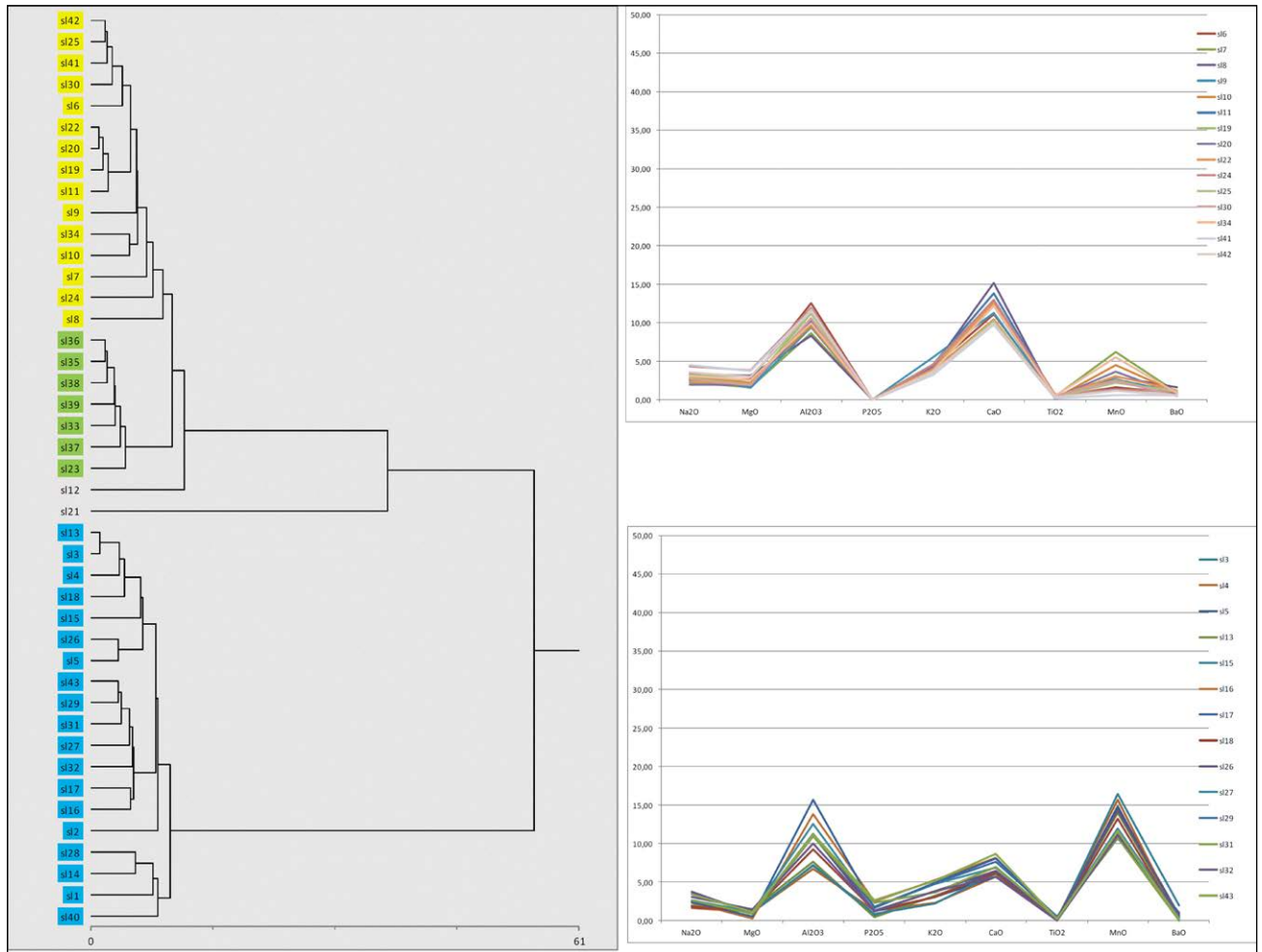
analyser, og resultatet kan visualiseres i et "dendrogram", som der er vist til venstre i figur 20.6. Forenklet sagt er forskellen mellem de to analyser større, jo længere til højre man skal for at komme fra den ene analyse til den anden ved at følge linjerne. Der er derfor kun lille forskel mellem to analyser i f.eks. den gule gruppe og stor forskel mellem en analyse i den gule og en analyse i den blå gruppe.

Igen er den statistiske analyse udført, efter at indholdet af jernoxid er fraregnet, og til højre i figuren ses to diagrammer, som viser sammensætninger af de to gruppers slaggeindeslutninger. Det er sandsynligt, at grupperne markeret som gul og grøn i virkeligheden er dele af samme gruppe.

Som det kan ses i figur 20.4, er slaggerne i de to grupper ikke tilfældigt fordelt. Den blå gruppe udgøres af slaggeindeslutninger i laget af jern på den ene side af kniven, mens den gule/grønne gruppe ligger i den centrale lamel af stål. Det er helt almindeligt, at hvert stykke jern i en genstand på denne måde har sin egen signatur. Tilsvarende specifikke signaturer for slaggeindeslutninger i de enkelte lag af jern eller stål er også set i et mønstersvejet merovingisk sværd (Dillmann et al. 2005).

Da slaggeindeslutningerne i et stykke jern primært består af udvindingsslagge, som ikke siden udvindingen har haft kontakt med omgivelserne, vil deres sammensætning først og fremmest være afhængig af den malm, som blev brugt; men også af det bidrag, som kom fra ler og aske i udvindingsovnene (Hedges & Salter 1979, Buchwald & Wivel 1998).

Af denne grund har analyser af slaggeindeslutninger været anvendt til at undersøge lokale problemstillinger



Figur 20.6. Statistisk analyse af slaggeindeslutninger i kniv C60529-2 fra Fangberget. Grupperne er i diagrammet til venstre markeret med henholdsvis gul/grøn og blå. Til højre ses indholdet af forskellige oxider i slaggerne (kapitel 14 i denne bogen, Jouttijärvi 2013 a)

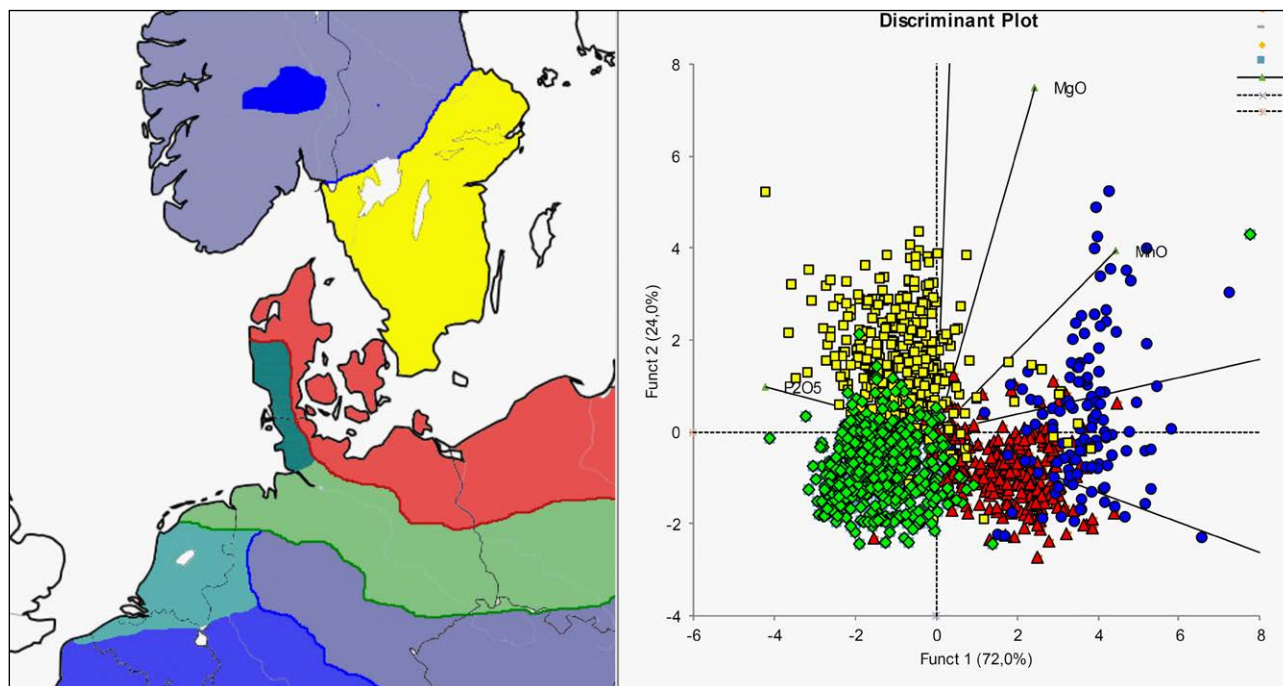
som eksempelvis ændringer i kilderne til forskellige kvaliteter af jern og stål over tid i Novgorod (Jeffrey & Rehren 2012) eller forskellig oprindelse af lupper anvendt ved smedning af dobbelt-pyramideformede jernbarrer (Bauvais et al. 2017, Dillmann & L'Heritier 2007)

Ved statistisk analyse af mere end 2000 analyser af udvindingsslagger fra Nordeuropa kan man identificere flere områder, som har forskellig geologi. Det viser sig i form af tydelige forskelle i den kemiske sammensætning af malme og ler og dermed i udvindingsslaggerne. De største forskelle findes mellem morænen i Det Nordeuropæiske Lavland (Sydskandinavien) og områder med højtliggende grundfjeld som Norge/Sverige og Centraleuropa. Desuden er der også en væsentlig forskel mellem områderne nord og syd for israndslinjen i den sidste istid (Weichsel-istiden). Det skyldes en udvaskning af især kalk fra materialet syd for israndslinjen.

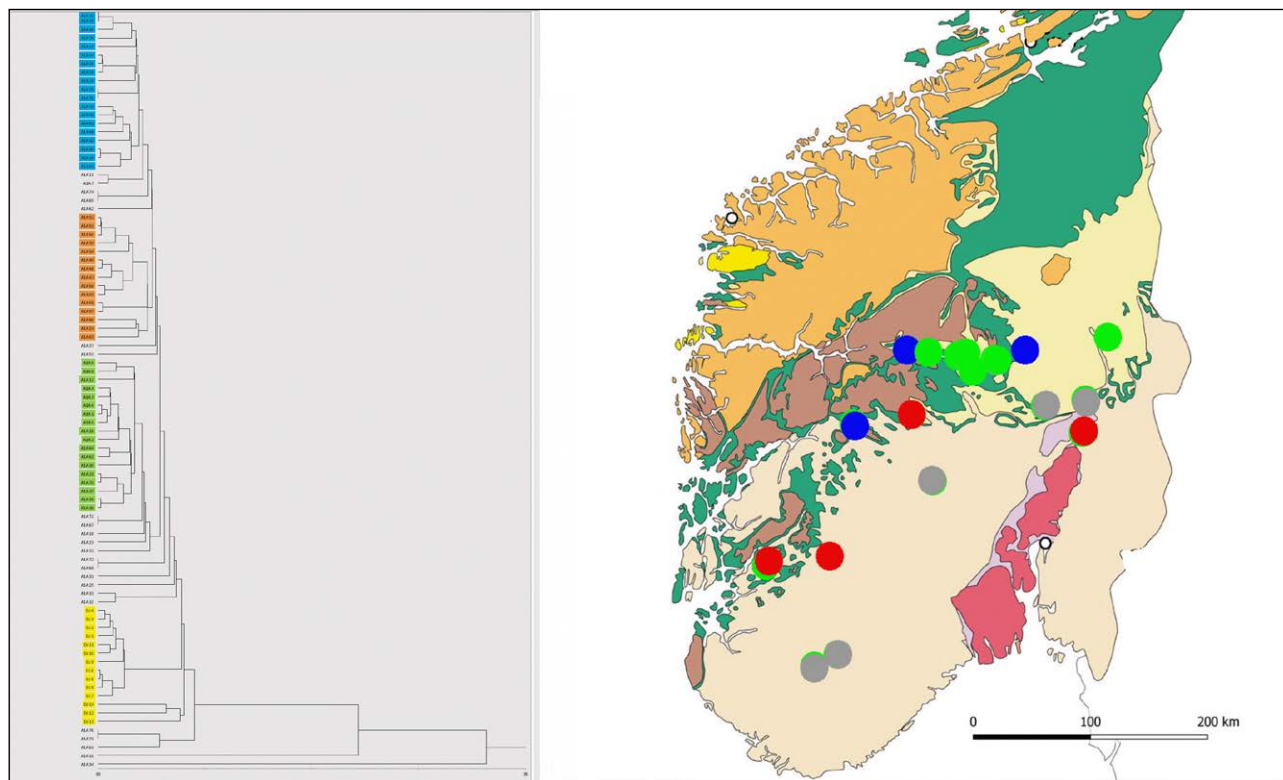
I figur 20.7 er vist de omtrentlige grænser mellem områder, som kan adskilles på grund af de geologiske

forskelle. Til højre ses et såkaldt diskriminant diagram, som viser, at slaggerne fra de forskellige områder statistisk kan skelnes fra hinanden. Ved at sammenligne analyserne af slaggeindeslutningerne med analyser af udvindingsslaggerne er man i stand til at sandsynliggøre, i hvilket af disse områder jernet i en genstand er udvundet. Det er naturligvis en ganske grov form for proveniensbestemmelse, da områderne er ret store, og analyse af hovedelementer vil derfor ikke kunne anvendes ved bedømmelse af lokale problemstillinger. En mere sikker og detaljeret bestemmelse kan dog med stor sandsynlighed fås ved også at foretage analyser af sporelementer (typisk stoffer som findes i koncentrationer mellem 0,1 % og 0,1 ppm) (Coustures et al. 2003).

I figur 20.8 er til venstre vist resultatet af en multi-variabel statistisk clustering analyse af sporelementer i udvindingsslagger fra Norge. Der kan identificeres i det mindste fire forskellige grupper, som er markeret med farver. Til højre er placeringerne af udvindingsslaggerne vist på kortet.



Figur 20.7. Omtrentlige områder, som kan identificeres på baggrund af analyser af hovedelementer. Til højre et diskriminant-plot, som viser, at de fire områder i Skandinavien kan skelnes fra hinanden. Farverne svarer til farverne på de fire nordligste områder på kortet til venstre (Tegning Jouttijärvi).



Figur 20.8. Foreløbig statistisk analyse af lokale grupper baseret på sporelementer i udvindingslagger fra Norge (Tegning Jouttijärvi).

Som det ses, er der i det mindste en tendens til, at grupperne ligger i forskellige geografiske områder, idet de blå og grønne ligger i forbindelse med Prækambriske og sedimentære klipper nordligst, mens de røde ligger i den Fennoscandiske zone længere sydpå, hvor også Djupetjønn (Jouttijärvi 2019) befinder sig. Det peger på, at sporelementerne, ved opbygning af en større database, vil kunne udnyttes med henblik på at foretage mere præcise proveniensbestemmelser af jern inden for Norge. I øjeblikket arbejder forfatteren på at udbygge databasen, ikke blot med mere materiale fra Norge, Sverige og Danmark, men også fra den nordlige del af kontinentet. Det er nødvendigt at dække et større område, da jern må forventes ikke kun at have været af lokal oprindelse, men også at kunne have været hentet længere borte fra, enten i form af barrer eller i form af færdige genstande.

Der er i øjeblikket stor fokus på metoder til proveniensbestemmelse af jern, og de bliver løbende udviklet. Foruden analyser af hoved- og sporelementer arbejdes der således også med at supplere disse med analyser af blyisotoper eller strontiumisotoper (Brauns et al. 2013).

20.7 KONKLUSION

Kemiske og metallurgiske analyser har vist sig at være et godt redskab ved fortolkningen af de arkæologiske fund fra Ånestad (kapitel 10) og Fangberget (kapitel 14). Det har herved været muligt at få en detaljeret viden om det jernhåndværk, som har fundet sted på lokaliteterne, herunder den årlige (eller sæsonbestemte) produktion, udbyttet af jern og den fysiske organisering af udvinding og smedning. Det skal dog understreges, at nok er de naturvidenskabelige undersøgelser såkaldt "eksakt" videnskab; men der er stadig tale om en fortolkning baseret på resultaterne af tidligere foretagne undersøgelser, sammenholdt med analyser af en udvalgt del af det arkæologiske kildemateriale.

Det er sandsynligt, at ikke alle processer er afspejlet i det bevarede arkæologiske kildemateriale, og samtidig kan der være materiale til stede, som vi ikke på nuværende tidspunkt er opmærksomme på værdien af. Det er således kun få år siden, at man er begyndt at lave detaljerede analyser af hammerskæl, som hidtil blot er blevet set som en indikation af smedning, og som har dannet grundlag for spredningskort, som viser placeringen af ambolten.

Det kan derfor ikke forventes, at vores billede af fortidens teknologi er komplet, og med udviklingen af analyseteknologier og opsamling af viden og referenceanalyser fra arkæologiske udgravninger kan fortolkningen af en given undersøgelse ændre sig eller

nuanceres i fremtiden. På den måde vil også undersøgelserne fra Ånestad og Fangberget kunne bidrage til tolkningen af fremtidige udgravninger.

20.8 ABSTRACT: METALLURGICAL SAMPLING

Archaeometallurgy encompasses various analytical methods that can help with the interpretation of archaeological traces of metal crafts. Furthermore, it can provide information on the manufacture and origin of objects which cannot be obtained by any other means.

Chemical analysis of slag can tell whether it originates from iron smelting, primary smithing (purification) of the extracted iron or from forging of objects. In Ånestad, statistical analysis of the compositions of smelting slag showed that one year of iron production probably consisted of smelting in two or three furnaces.

The distribution of different types of process waste in systematically sampled soil samples showed that a smithy, used for primary smithing of the iron from the smelting, was located in the central part of central Ånestad I. In particular, analysis of hammerscale is important, as it provides detailed information on the smithing processes.

Microscopy of samples taken as cross sections of iron objects from Fangberget showed how they had been forged by the combination of iron and steel, showing the quality of, for example, knives, and illustrating the knowledge and skills of the local blacksmiths. In addition, analysis of slag inclusions in the iron can, as compared with analyses of smelting slag, give an indication of its geographical origin.

20.9 REFERENCER

- Bauvais, Sylvain, Berranger, Marion, Boukezzoula, Mostepha, Disser, Antoine, Vega, E, Leroy, Stéphanie Disser, Vega, Enrique, Aubert, Michel, Dillmann, Philippe & Fluzin, Philippe
2017 'Guard the Good Deposit': Technology, Provenance and Dating of Bipyramidal Iron Semi-Products of the Durrenentzen Deposit (Haut-Rhin, France). *Archaeometry* 60 (2): 290–307.
- Brauns, Michael, Gassmann, Guntram, Pernicka, Ernst, Schwab, Roland & Wieland, Günther
2013 Provenance of Iron Age Iron in Southern Germany: A New Approach. *Journal of Archaeological Science* 40,2 (2013): 841–849.
- Buchwald, Vagn Fabritius
1998 Myremalm. *Geologisk Tidsskrift, hefte 1:1–26*.
2005 *Iron and steel in ancient times*. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, København.

- Comeau, Brad , Cheesman, Lucy , Slater, Jessie & Doonan, Roger
2012 Out of the Furnace and into the Field: Reconceptualising Metallurgical Processes as Practice. *Proceedings of the 39th International Symposium for Archaeometry*, Leuven, s. 293–301.
- Coustures, Marie-Pierre , Béziat, Didier, Tollon, Francis, Domergue, Claude, Long, Luc & Rebiscoul, André
2003 The Use of Trace Element Analysis of Entrapped Slag Inclusions to Establish Ore – Bar Iron Links: Examples from Two Gallo–Roman Iron-making Sites in France. *Archaeometry* 45 (4):599–613.
- Crew, Peter
2007 CaO enhancement in slags: the influence of fluxing or of fuel ash? I *Abstracts of Early Ironworking in Europe II: archaeology, technology and experiment*, redigert av Peter Crew og Susan Crew, s. 50–52. Plas Tan y Bwlch, Maentwrog.
- Dieudonné-Glad, N., & Conte, P.
2011 Smithing at the priory of Lavindière, Corrèze, France, 13th and 16th centuries. *Historical Metallurgy* 45: 1–7.
- Dillmann, Philippe, Aranda, Régis, Lherithier, Maxime & Fluzin, Philippe
2005 Forging of iron-steel artifacts: archaeology, experiments and archaeometry. I *1st International Conference of Paleosiderurgy and Industrial Heritage Recovery. Iron, History and Heritage*. San Sebastian.
- Dillmann, Philippe & L'Heritier, Maxime
2007 Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science* 34: 1810–1823.
- Doonan, Roger C. P. & Mazarakis Ainian, Alexander
2007 Forging identity in Early Iron Age Greece: implications of the metalworking evidence from Oropos. I Oropos and Euboea in the Early Iron Age, redigert av A. Mazarakis Ainian. University of Thessaly Press, Volos, 361–378.
- Dungworth, David & Wilkes, Rodger
2009 'Understanding hammerscale: the use of high-speed film and electron microscopy'. *Historical Metallurgy* 43:33–46.
- Espelund, Arne
2003 The Four Phases Carbon – Gas – Slag – Metal and their Interaction in Bloomery Ironmaking. I *Prehistoric and Medieval Direct Iron Smelting in Scandinavia and Europe*, redigert av Lars Christian Nørbach, s. 195–201. Aarhus University Press, Aarhus.
2008 *Bondejern i Norge*. Nytt endret opptrykk. Arketype, Trondhjem.
- Gordon, Robert. B.
1997 Process Deduced from Ironmaking Wastes and Artefacts. *Journal of Archaeological Science* 24: 9–18.
- Jouttijärvi, Arne
2010 Smedens bygninger. En række rum fra jernalderen til 1700-tallet. I Smedens Rum 1, Værkstedet Arbejdsrapport fra seminar den 14. oktober 2010 på Københavns Universitet, redigert av Henriette Lyngstrøm (ansv.), Martin Winther Olesen og Lone Gebauer Thomsen, s. 137-152; Arkæologiske Skrifter 9; København.
2013 Iron and processes in Scandinavian blacksmithing workshops from the Iron Age to the 14th century. I: The World of Iron, redigert av Jane Humphris & Thilo Rehren, s. 402–408; London.
2015 Scales and Spheres. *Historical Metallurgy*, vol 48 for 2014:41–46.
2017a Slagger, jern og keramisk materiale fra Fangberget projektnr. 220280, Saksnummer 12/5863. Upubliseret report 16-15, Heimdal-archaeometry.
2017b Analyse af slagger, malm og jordprøver fra Mosetertoppen (Hafjell). Projektnr.: 430325 Saksnr.: 2008/695. Upubliseret rapport september 2017. Heimdal-archaeometry.
2017c Jernhåndtering ved Ånestad, Løten kommune, Riksvei 3/25 projektnr. 220244 saksnr. 2011/12427. Upubliseret report 17-01, Heimdal-archaeometry.
2019 To lokaliteter med jernudvinding ved Djupetjønn, Saksnummer 7/01969. Upubliseret report april 2019, Heimdal-archaeometry.
- Jouttijärvi, Arne, Andersen, Lars Møller, Thomsen, Turi & Moltsen, Annine S. A.
2005 "Affald fra metalbearbejdning" og "Værkstedets funktion", kapitler I "Viborg Sønderø II. Arkæologi og naturvidenskab i et værkstedsområde fra det tidlige 1000-tal, redigert av Mette Iversen, David Robinson, Jesper Hjerminde og Charlie Christensen. Århus.
- Jeffrey, D. & Rehren, Thilo
2012 Investigating social change in 12th–13th century Novgorod using slag inclusions. I The archaeology of medieval Novgorod. 4: *The archaeology of medieval Novgorod in context: studies in centre/periphery relations*, redigert av Brisbane, Mark A., Makarov, Nikolaj A., Nosov, Evgenij N., s. 195–209. Oxbow books. Oxford.

- Larsen, Jan Henning
 2009 *Jernvinneundersøkelser. Faglig program*
 2. Varia 78. Oslo: Kulturhistorisk museum,
 Fornminneseksjonen.
 2013 Ovner med slaggrøp i Sydøst-Norge - 400
 BC-AD 800 - likheter og forskjeller, I: *Ovnstypologi*
og ovnskronologi i den nordiske jernvinna. Prosjekt -
Jernvinna i Oppland - Symposium på Kittilbu 16.-
18. juni 2009, artikkelsamling, redigert av Bernt
 Rundberget; Jan Henning Larsen & Tom H. Borse
 Haraldsen, s. 59–72. Portal forlag.
- Lyngstrøm, Henriette
 2008 *Dansk Jern - en kulturhistorisk analyse af*
fremstilling, fordeling og forbrug. Det Kongelige
 Nordiske Oldskriftselskab, København, 2008.
- McDonnell, Gerry
 1986 *The classification of early iron working slags*.
 Unpublished PhD thesis, University of Aston,
 Birmingham.
- Mills, Alison & McDonnell, Gerry
 1992 *The identification and analysis of the*
hammerscale from Burton Dassett, Warwickshire, 1992
 Ancient Monuments Laboratory Report 47/92,
 London English Heritage.
- Pleiner, Radomir
 2003 European Iron Blooms. I *Prehistoric and*
Medieval Direct Iron Smelting in Scandinavia and
Europe: Aspects of Technology and Science, redigert
 av Lars Nørbaek, s. 183–189, 305–307. Aarhus
 University Press, Aarhus.
 2000 *Iron in Archaeology: The European Bloomery*
Smelters. Archeologický Ústav Avcr, Prague.
 2006 *Iron in archaeology: The early European*
blacksmiths. Prague.
- Saage, Ragnar
 2013 The Smithy site of Käku. Archaeology
 outdoors and indoors. MA Thesis, University of
 Tallinn 2013.
- Serneels, Vincent
 1993 *Archéométrie des scories du fer*. Recherches sur la
 sidérurgie ancienne en Suisse occidentale (CAR 61).
- Serneels, Vincent & Perret, Sébastien
 2003 Quantification of smithing activities based
 on the investigation of slag and other material
 remains. *Archaeometallurgy in Europe-Proceedings of*
the International Conference, s. 469–478. Associazione
 Italiana di Metallurgia, Milaan, Italy.
- Soullignac, Raphaëlle & Serneels, Vincent
 2014 The reconstruction of smithing activities
 through an ethnoarchaeological and archaeometric
 approach of metallic wastes. *Early Iron in Europe*,
 redigert av Brigitte Cech & Thilo Rehren.
 Monographies Instrumentum 50. Collection dirigée
 par Michel Feugère. Éditiones monique mergoïl
 montagnac.
- Sperl, Gerhard
 1980 Über Die Typologie Urzeitlicher,
 Frühgeschichtlicher Und Mittelalterlicher
 Eisenhüttenschlacken. Österreichische Akademie
 der Wissenschaften, Wien.
- Thiele, Ádám
 2010 Smelting experiments in the early medieval
 fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron
 bloom, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*,
 54(2):99–104.
- Thiele, Ádám & Dévényi, László
 2013 Modelling possibilities of the medieval
 bloomery process under laboratory conditions.
Materials Science Forum 729, 290–295.
- Thiele, Ádám, Hošek, Jiří.
 2015 Mechanical Properties of Medieval
 Bloomery Iron Materials - Comparative Tensile
 and Charpy-tests on Bloomery Iron Samples
 and S235JRG2. *Periodica Polytechnica Mechanical*
Engineering 59.1 (2015): 35–38.
- Tylecote, Ronald F., Gilmour, Brian J. J.
 1996 The Metallography of Early Ferrous Edge
 Tools and Edged Weapons." *BAR British Series*. 155.
 Archaeopress. Oxford.
- Veldhuijzen, Harald Alexander
 2009 Red hot: the smithy at Tel Beth-Shemesh.
Near Eastern Archaeology, 72(3): 129–131.
- Veldhuijzen, Harald Alexander
 2010 Of slag and scales: micro-stratigraphy and
 micro-magnetic material at metallurgical excavations.
 IA Timeless Vale: Archaeology and Related Studies
 of the Jordan Valley, redigert av Kaptijn, E. & Petit,
 L. P., s. 155–166. Amsterdam University Press,
 Amsterdam.
- Williams, Gwilym
 2012 Where are all the smiths? Some reflections
 on the excavation of rural blacksmithing. *IfA Diggers'*
Forum newsletter 10: Winter 2012.
- Zavyalov, Vladimir I & Terekhova, Nataliya N.
 2014 Three-fold welding technology in the
 blacksmith's craft of Medieval Rus' (concerning
 Scandinavian innovations). I *Archaeometallurgy in*
Europe III. Proceedings of the 3rd International
 Conference Deutsches Bergbau-Museum Bochum
 June 29 – July 1, 2011, redigert av Andreas
 Hauptmann & Diana Modarressi-Tehrani, s. 247–
 254. Der ANSCHNITT. Beiheft 26. Bochum.