



Faculteit Letteren & Wijsbegeerte

Sebastiaan Windey

## ***Middeleeuwse Metallurgie***

*Archeometallurgische studie van metaalslakken uit drie Oost-Vlaamse sites*

Masterproef voorgelegd tot het behalen van de graad van  
Master in de archeologie

Academiejaar 2012-2013

Promotor      Prof. dr.. Wim De Clercq  
                    Vakgroep Archeologie



## Dankwoord

Deze thesis zou niet tot een goed einde zijn gebracht zonder de hulp van enkele mensen die ik graag zou vernoemen.

Graag had ik in de eerste plaats Dra. Kim Eekelers en Prof. dr. Patrick Degryse van de KUL voor hun wetenschappelijke hulp bij het thema van deze proef, door hun spontane bijstand kon ik dit schrijven tot goed einde brengen. Professor dr. Wim De Clerq wil ik bedanken voor het enthousiasme in het onderwerp, de vele ideeën en tips die hij me gaf en het vertrouwen dat hij in mij stelde. Ook drs. Tim Clerbaut bedank ik voor de spontaniteit en het gezelschap tijdens mijn materiaalverwerkingen.

Verder zou ik graag Maarten Berkers van de Zwarte doos Gent en Jeroen Van Vaerenberg van de Archeologische Dienst Waasland willen bedanken voor de tips en het verschaffen van de broodnodige documentatie. Voor dit laatste wil ik ook Els Bautens van het SteM bedanken. Dr. Bart Vekemans van de Analytische Chemie bedank ik in het bijzonder voor het vertrouwen en de mogelijkheid tot een chemische analyse van het materiaal.

Bedankt vader voor het vele nalezen en verbeteren en de interesse in het onderwerp, bedankt moeder voor de goeie zorgen, en bedankt Wille voor het luisterende oor en spontane vragen. Alle drie bedankt voor de mogelijkheid die jullie me gaven om te doen wat ik graag doe.

Jerome, merci voor je fototoestel, Hannes voor het nalezen en stimulerende twijfel en woorden van wanhoop over mijn eindwerk. Karel Desmet, bedankt voor je franse vertalingen, zo even uit de losse pols tijdens die lange autorit naar beschaving.

Hannah. Bedankt dat je er bent, op zoveel meer manieren dan je denkt.

Universiteit Gent  
Faculteit Letteren en Wijsbegeerte  
Vakgroep Archeologie

## ***Middeleeuwse Metallurgie***

*Archeometallurgische studie van ijzerslakken uit drie Oost-Vlaamse sites*

door  
Sebastiaan Windey

Promotor: Prof. dr. Wim De Clercq

Afstudeerwerk ingediend tot het behalen van de graad van Master in de Archeologie

Academiejaar 2012-2013

### **Samenvatting**

In voorliggend afstudeerwerk wordt met behulp van archeometallurgische technieken de metaalslakken afkomstig van drie Oost-Vlaamse sites bestudeerd. De sites omsluiten een periode van ca. de 10<sup>e</sup> tot de vroege 14<sup>e</sup> eeuw. Metaalslakken zijn goed vertegenwoordigd op archeologische sites, maar worden vaak als een secundaire vondstcategorie beschouwd. Via macroscopische analyse en XRF wordt dit materiaal gesitueerd in het ijzermetallurgisch proces en er wordt onderzocht welke bijdrage het kan leveren aan de interpretatie van de site. De studie laat zien dat dit materiaal heel wat specifieke informatie over ijzerproductie en –bewerking te bieden heeft.

De drie sites worden nadien in een breder middeleeuws perspectief geplaatst om de import en de lokale productie van het ijzer te bespreken. Geconcludeerd kan worden dat ijzerproductie in - zowel huidig als Graafschap - Vlaanderen tijdens de middeleeuwen aanwezig was, maar dat het een eerder marginale bezigheid moet zijn geweest en dat ijzerslakken aldus voornamelijk als post-reductiemateriaal (raffinage en smeden) moeten behandeld worden.

### **Sleutelwoorden**

archeometallurgie, middeleeuwen, slakken, ijzer, X-stralen fluorescentie, macroscopisch onderzoek

## Résumé

Dans cette thèse on a, à l'aide de techniques archeométalluriques, étudié les scories provenant de trois sites de Flandre orientale. Les sites renferment une époque du 10<sup>ième</sup> au début de la 14<sup>ième</sup> siècle.

Les scories sont bien représentées sur les sites archéologiques, mais sont souvent considérées comme une catégorie de découverte secondaire. Le matériel est situé, par l'analyse macroscopique et spectrométrie de fluorescence X, dans la chaîne opératoire de la production du fer et il est examiné quel contribution cela peut donner à l'interprétation de ce site. Cet étude montre que ce matériel offre beaucoup d'information spécifique sur la production du fer et la ferronnerie.

Les trois sites sont mis dans un contexte médiéval plus large, pour discuter les importations et la production locale du fer. On peut conclure que la production du fer était présent, aussi bien en Flandre actuelle qu'en la Comté des Flandres, mais était plutôt une activité marginale et que les scories soient traitées surtout comme matériel de post-reduction (raffinage et forgeant).

## Mots-clés

archéométallurgie, moyens âges, des scories, fer, Spectrométrie de fluorescence X (SFX), examen macroscopique

---

## Abstract

In this thesis, the metallurgical debris – ironslags in particular – of three sites situated in Oost-Vlaanderen (East-Flanders, Belgium) dating from c. 10<sup>th</sup> to 14<sup>th</sup> century, are studied by techniques known in archaeometallurgy.

Ironslags are frequently found at archaeological sites, but are often treated as a secondary category. With the help of macroscopical and chemical analysis this material is placed in the *chaîne opératoire* of the medieval iron production and the contribution to the interpretation of the site is examined.

The three sites are then placed in a larger medieval perspective to examine the import and local production in the County of Flanders. As a conclusion it can be assumed that the production of iron was existing in Flanders during the Middle Ages, but that it is likely that it was more a marginal activity. Most ironslags found at medieval sites must therefore be treated as post-production slags (refinement and/or smiting) rather than slags originating from the production-phase.

## Keywords

archaeometallurgy, middle ages, slag, iron, X-ray fluorescence (XRF), macroscopic examination



# Inhoudstafel

Inleiding en doelstelling .....	1
---------------------------------	---

## **Deel I:            Technologie van de middeleeuwse ijzerbewerking en -productie.....3**

Inleiding.....	4
1. Erts.....	5
2. Brandstof.....	7
2.1. Houtskool .....	7
2.2. Steenkool.....	8
2.3. Andere .....	9
3. Reductie van het mineraal .....	10
3.1. Voorbehandeling .....	10
3.2. Reductieproces.....	11
3.2.1. Directe proces: de Laagoven .....	13
3.2.2. Indirecte proces: De Hoogoven .....	14
4. Bewerking.....	15
4.1. Raffinageproces .....	15
4.2. Smeden .....	15
5. Archeologische zichtbaarheid ijzerproductie en -bewerking .....	16
5.1. Ovenstructuur.....	16
5.2. Smeedhaard.....	18
5.3. IJzer en slak .....	18
5.3.1. Wolf/Loupe/spons.....	18
5.3.2. Slak.....	20

## **Deel II:           Onderzoek naar ijzerproductie en -bewerking.....26**

Inleiding.....	27
1. Onderzoeksmethode en analysetechnieken .....	29
2. Chemische samenstelling van de ijzerslak.....	31
2.1. Reductieslak .....	31
2.2. Smeedslak.....	32
3. Sites .....	34
3.1. Klein Sinaai - Boudelo.....	34
3.1.1. Inleiding .....	34

3.1.2.	Materiaal en analyse .....	37
3.1.3.	Interpretatie.....	46
3.2.	Gent - Nieuwe Beestenmarkt .....	48
3.2.1.	Inleiding .....	48
3.2.2.	Materiaal en analyse .....	50
3.2.3.	Interpretatie.....	57
3.3.	Melsele - Brielstraat.....	59
3.3.1.	Inleiding .....	59
3.3.2.	Materiaal en analyse .....	60
3.3.3.	Interpretatie.....	65
4.	Conclusie van de analyses .....	67

**Deel III:           *Het ijzer in een breder middeleeuws beeld* ..... 69**

Inleiding.....	71
1.    Middeleeuwse innovatie.....	72
2.    Cisterciënzers en ijzerproductie.....	74
3.    Organisatie van de stedelijke smeden .....	74
4.    Handel .....	75
4.1.    Ijzer .....	75
4.1.1.    Lokaal.....	75
4.1.2.    Import.....	77
4.2.    Brandstof.....	79
<b>Conclusie</b>	<b>81</b>
<b>Bibliografie</b>	<b>83</b>
<b>Bijlagen</b>	<b>88</b>



## Lijst van Tabellen

Tabel 1:	Belangrijkste anorganische bestanddelen van steenkoolassen. Uit Speight 2012, 198: tabel 7.4.	33
Tabel 2	Totale gewichten (g) van de metaalslakken uit de zes sporen.	38
Tabel 3:	Resultaten van de chemische analyse. Het betreffen de gemiddelde waarden van twee verschillende meetpunten op hetzelfde monster (uitgezonderd van monster ksb4_sas_1_2). Zie bijlage 4 voor de volledige resultaten	42
Tabel 4:	Gewichten van de metaalslakken uit spoor 2 en 3	50
Tabel 5:	Resultaten van de chemische analyse. Het betreffen de gemiddelde waarden van twee meetpunten op hetzelfde monster. Legende: p = tapslak; pcb = <i>plano convex bottom</i> ; ws = <i>furnace lining</i> ; n.d.: not detected. Zie bijlage 4 voor de volledige resultaten	54
Tabel 6:	Totale gewichten van de metaalslakken aangetroffen op de site, naar Derieuw et al. 2012, 43.	60
Tabel 7:	Tabel met de gemiddelde resultaten van de chemische samenstelling van de <i>furnace lining</i> uit spoor 54 (Figuur 31). Zie bijlage 4 voor de volledige resultaten	64

## Lijst van Afbeeldingen

Figuur 1:	1. <i>Platzmeiler</i> , 2. <i>Grubenmeiler</i> ; uit Smiths 1959, De la Pirotechnia III. 173.	8
Figuur 2:	Schematische voorstelling van een laagoven (aftapoven), met de rechts het proces van chemische reductie; uit Pleiner 2000: 134, fig. 33.	14
Figuur 3:	De bovenzijde van een verglaasde (smeed)ovenwand/ <i>furnace lining</i> . (Melsele-Brielstraat spoor 54 (mls_ws_1))	16
Figuur 4:	Voorbeelden van vroege laagovens. 1. Domed furnace: Unterpullendorf, Duitsland; La Tène. 2. Slak pit-furnace: Scharmbeck, Duitsland; Romeinse periode. De pijlen duiden de luchttoevoer aan. Uit Pleiner 2000, 273: figuur 73.	17
Figuur 5:	Drie mogelijke voorstellingen van een open smeedhaard. 1. ovale kuil met zijdelinkse luchttoevoer. 2. Vierkante kuil met laterale luchttoevoer (om langere objecten te verwarmen). 3. Een (met stenen versterkte) open haard met of zonder luchttoevoer. Uit Serneels, Feugère 1998, 28: figuur 21.	18
Figuur 6:	Schematische voorstelling van de aftapoven. 1. Wolf; 2. Verglaasde ovenwand met residu van slak, brandstof en erts; 3. Sinter; 4. <i>Furnace coolde slag</i> ; 5. Tapslak; 6. Geaccumuleerde tapslak “ <i>en forme de plaque-éventail</i> ”. Uit Pleiner 2000, 258: figuur 67.	22
Figuur 7:	Schematische voorstelling van de vorming van de plano-convexe slak. Verschillende factoren hebben invloed op de samenstelling van de slak. Uit: Serneels, Perret 2003, 472: figuur 3.	23
Figuur 8:	De invloed van haard en luchtstroom met betrekking tot positie van de PCB. Uit: Serneels, Perret 2003, 474: figuur 4.	24
Figuur 9:	De locatie van de drie onderzochte sites binnen de laatmiddeleeuwse grenzen van Graafschap Vlaanderen en de huidige grenzen van België. Kaart samengesteld in ENSI ArcMAP 9.3.	27
Figuur 10:	De EDAX Eagle III microprobe, UGent Vakgroep Analytische Chemie XMI.	30
Figuur 11:	Schematische voorstelling van het smeedproces, met de oorsprong van de voornaamste chemische elementen die in de smeedslak kunnen worden aangetroffen. Naar: Serneels & Perret 2003, 472: figuur 3; Serneels, Feugère 1998, 35: figuur 31.	32
Figuur 12:	Overzichtskaart van de Boudelo-site en zuidelijke percelen. Het onderzoek uitgevoerd door de UGent is aangeduid als “Sleuf KSB2012”. De afvalkuil beschreven door De Belie (1997) situeerde zich tussen de abdij en de sleuf (rode markering). Naar De Smedt <i>et al.</i> 2013, 3 en De Belie 1997. Kaart samengesteld in ENSI ArcMAP 9.3.	36
Figuur 13:	Coupefoto vanuit het noorden van sporen 26 (1) en 25 (2) met aanduidingen van de verschillende lagen.	38
Figuur 14:	Doorsnede van een planoconvexe smeedslak uit spoor 25 (ksb25_pcb_1) (links). Bovenzijde van een PCB uit spoor 4 (ksb4_sas_2) (rechts).	39
Figuur 15:	Afbeelding van de ijzerwolf uit spoor 4 (ksb4_pcb-wolf). De metaalgrijze zone bestaat uit metallisch ijzer.	40

Figuur 16: Voorbeeld van een <i>non-diagnostic slag</i> afkomstig uit spoor 26 (ksb26_nd_1). Bemerk de fragmenten steenkool vervat in een matrix van ijzeroxide en fayaliet.	41
Figuur 17: Afbeelding van de voor- (rechts) en achterzijde (links) van een verglaasd fragment <i>lining</i> uit spoor 25 (ksb25_nd_2).	42
Figuur 18: De twee XRF-spectra van de geanalyseerde smeedslakken vergeleken. De elementen Mg, P, K, en Ti variëren licht, maar de hoofdelementen blijven vergelijkbaar.	43
Figuur 19: Monsternr. ksb25_sgd. De verhoogde aluminiumwaarde kan wijzen op een fusie tussen brandstof, ijzer en ovenwand.	44
Figuur 20: Twee XRF-spectra van de <i>non-diagnostic slag</i> uit Klein Sinaai – Boudelo (ksb_sgd (groen)) en een <i>tap slag</i> uit Gent – Nieuwe Beestenmarkt (bm2_p_2 (rood)). De aanwezigheid van SO <sub>3</sub> en de verhoogde SiO <sub>2</sub> en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -waarden in het monster ksb_sgd duiden op een schakel met de post-reductiefase.	44
Figuur 21: Detail van de Sint-Baafsabdij en het gelijknamige dorp, net voor de bouw van de dwangburcht in 1540. Zicht vanuit het noordoosten. Uit het Panoramisch Gezicht op Gent, 1534. ©STAM Gent	48
Figuur 22: Overzicht van de archeologische sporen aangetroffen in een gedeelte van de Sint-Machariuswijk. 1. Prehistorische vondsten; 2. Romeinse occupatiesporen; 3. Vroeg-middeleeuwse sporen; 4. Merovingische/Karolingische waterput; 5. Middeleeuwse gebouwssporen; 6. Sporen van middeleeuwse “ijzerbewerking”; 7. Ommuring van het Spanjaardenkasteel. Uit: Laleman 1996, 293: figuur 2.	49
Figuur 23: Afbeelding van een <i>plano convex smithing hearth bottom</i> uit spoor 3 (bm3_pcb_1). Aan de onderkant (links) zijn negatieve afdrukken de houtskool nog zichtbaar. Rechts is de doorsnede van dezelfde slak afgebeeld waar de lichte plano-convexe vorm zichtbaar wordt.	51
Figuur 24: a. Samenstelling van verschillende aftapslakken uit kuil 2 (v.l.n.r. bm2_p_5, bm2_p_2, bm2_p_3, bm2_p_4, en bm2_p_1 uiterst rechts); b. detail van gelaagde structuur (bm2_p_3); c. detail van de vloevorm (bm2_p_4).	52
Figuur 25: Voor- (links) en achterzijde van een fragment verglaasde <i>furnace lining</i> (bm2_ws_1). Deze is voorzien van een ronde opening op de plaats waar de <i>tuyère</i> geplaatst zat.	53
Figuur 26: Afbeelding van de geanalyseerde <i>furnace lining</i> bm3_ws_1. Bemerk de restanten van de roodgebakken klei op de verglaasde slak.	56
Figuur 27: Afbeelding van de “limoniet” uit spoor SM 91 B91-349 BB8 (2301) 4. Chemische analyse wees uit dat dit echter geen erts is, maar zeer sterk gecorrodeerd ijzer.	56
Figuur 28: Afbeelding van een planoconvexe smeedslak uit waterput 205 (mls205_pcb). Links: het zijaanzicht toont de halfconvexe vorm van de slak. Rechts is de wand van de smeedhaard goed zichtbaar.	61
Figuur 29: Afbeelding van een PCB uit spoor 6a (mls6_pcb_1). Links is de bovenzijde zichtbaar, terwijl rechts een foto van de doorsnede op de langste zijde zichtbaar is.	61
Figuur 30: Afbeelding van enkele smeedslakken van het type SAS uit spoor 314 (mls314_sas).	62
Figuur 31: De afbeelding toont de boven- (links) en onderzijde (rechts) van de <i>furnace lining</i> afkomstig uit spoor 54 (mls54_ws_1).	63
Figuur 32: Tuyèrefragment uit spoor 6c (mls6_tuyere_2)	64
Figuur 33: De XRF-spectra van de <i>lining</i> uit de site Melsele – Brielstraat (rood) en Gent – Nieuwe Beestenmarkt worden vergeleken. Bemerk de verschillen in intensiteit voor Si, K en Fe. Naast deze elementen vallen de afwezigheid van P bij Melsele – Brielstraat enerzijds en de afwezigheid van Cu bij Gent – Nieuwe Beestenmarkt direct op.	65
Figuur 34: Reconstructie van een 12 <sup>de</sup> eeuws waterrad uit de Abdij van Bordesley (Verenigd Koninkrijk). Uit Astill 1993, 270: fig. 177	73

## Inleiding en doelstelling

Deze thesis handelt over het onderzoek naar de productie en de bewerking van ijzer in de periode van 10<sup>e</sup> tot vroege 14<sup>e</sup> eeuw. In het onderzoek wordt gewerkt met de archeologische relictten die dit proces achterlaat. Deze relictten bestaan hoofdzakelijk uit metaalslakken.

De gehele structuur van de thesis is logisch opgebouwd. In Deel I wordt er kennis gemaakt met de technologie van ijzerproductie en –bewerking in de middeleeuwen. Dit luik beslaat het de bespreking van het erts, de brandstof, het reductieproces en de archeologische neerslag via een uitgebreide literatuurstudie. Deel II bestaat het archeometallurgisch gedeelte. Hier wordt het slakmateriaal dat werd aangetroffen op drie archeologische sites gesitueerd in Oost-Vlaanderen (Klein Sinaai – Boudelo, Gent – Nieuwe Beestenmarkt, Melsele – Brielstraat) geanalyseerd en geïnterpreteerd. Als laatste wordt Deel III besproken. Dit luik beslaat de literatuurstudie over de import en economische stromen in de context van de middeleeuwse samenleving.

Het opzet van deze thesis bestaat erin om via technieken uit de archeometallurgie het technische proces zo precies mogelijk te reconstrueren. Er wordt getracht inzicht te krijgen in de vaardigheden en het vakmanschap die aan de dag werden gebracht bij de productie en bewerking van het ijzer. De distributie van het metaal en de studie naar de herkomst ervan kunnen sterke getuigenissen zijn over de verschillende economische stromen. Het herkennen van verschillende stadia in de *chaîne opératoire* en het inschatten van de omvang van de productie heeft een belangrijke impact op de interpretatie van de site, zoals ruimtelijke en sociale organisatie van een smederij *versus* een smelterij of de relatie tussen lokale en regionale economische stromen. Naast het ijzer verdient ook de brandstof, door de impact op de omgeving, het milieu en economische stromen, een noemenswaardige plaats in de studie.

Deze vragen roepen een interdisciplinaire aanpak op van zowel de archeometallurgie, archeologie, historisch onderzoek, geologie en archeobotanie.

**Deel I:   Technologie van de middeleeuwse  
ijzerbewerking en -productie**

## Inleiding

*“How does the ploughman get his plough or his ploughshare, or his goad, but by my craft [the blacksmith]? How does the fisherman obtain his hook, or shoemaker his awl, or the tailor his needle, but by my work?”*

*Uit Ælfric van Eynsham's Colloquium ca. 1000 (Gem 1912, 191)*

In het eerste deel van deze verhandeling zal het technisch-archeologische aspect besproken worden. Het is immers belangrijk te weten welke stappen gepaard gaan met het proces van ijzerproductie (en ijzerbewerking) om te kunnen voorspellen wat kan aangetroffen worden op een archeologisch onderzoek. De structuur van dit deel volgt de *chaîne opératoire* van de ijzerbehandeling in zijn totaliteit (zie ook Bijlage 1) zo kan voor elke stap worden ingeschat waar, en onder welke vorm, archeologische neerslag kan worden aangetroffen.

Het laatste hoofdstuk in dit deel (*Deel I: 5. Archeologische zichtbaarheid ijzerproductie en -bewerking*) geeft een leidraad voor het macroscopisch onderzoek, waardoor het mogelijk is verschillende ijzerslakken eventueel al op het veld een eerste voorlopige interpretatie te geven.

De geografische focus van dit onderzoek ligt specifiek op Vlaanderen. Vooraleer in te gaan op de ijzerproductie en -bewerking op drie sites (Deel II), is belangrijk om bepaalde omgevingsvariabelen vast te stellen die de mogelijkheden en beperkingen stellen aan de lokale ijzerproductie. Ook dit komt in dit deel aan bod.

## 1. Erts

Vooraleer in te gaan op de verschillende soorten ertsen aanwezig in het studiegebied, dienen eerst enkele eigenschappen te worden besproken die het erts geschikt maken voor de directe ijzerproductie. Deze zijn: het ijzergehalte van het erts, de reduceerbaarheid en de chemische samenstelling van het ganggesteente (dit zijn de verontreinigende elementen in de erts, *gangue* [Eng.]) (Joosten 2004, 10). Ook dient er rekening mee worden gehouden dat slechts enkele ijzerverbindingen die in de natuur voorkomen werden gebruikt als erts; dit zijn de ijzeroxiden, ijzerhydroxiden en ijzercarbonaten. Andere mineralen zoals ijzerhoudende silicaten vereisten een te hoge temperatuur in het reductieproces (Joosten 2004, 10). Ook ijzerhoudende sulfiden, zoals pyriet, zijn vanwege het hoge zwavelgehalte vaak niet beschouwd als een goed erts (echter mits een voorbehandeling kan er kan worden gebruikt, zie 3.1 Voorbehandeling). Het zwavel in de ijzerstructuur heeft immers nefaste gevolgen voor de sterkte ervan.

In de eerste plaats is niet elk mineraal met een bepaald ijzergehalte een erts. Tegenwoordig wordt ijzerhoudend gesteente met een ijzerfractie van 20 tot 30% beschouwd als een erts. Echter, het reductieproces dat in de middeleeuwen werd gebruikt (de directe methode via de laagoven), produceerde naast metallisch ijzer, ook een slak die 40 tot 50% ijzer bevatte, waardoor het erts zelf al een voldoende hoog gehalte aan ijzer moest bevatten om het proces rendabel te houden (Joosten 2004, 10).

De reduceerbaarheid, dit is de eigenschap van een erts die de capaciteit om succesvol te worden omgezet naar ijzer uitdrukt, hangt nagenoeg volledig af van de porositeit van het erts. Dit komt doordat reductie werkzaam is aan de oppervlakte van de mineralen. Hoe meer blootgesteld oppervlakte, hoe beter en sneller het reductieproces (Joosten 2004, 11). De porositeit kan worden verhoogd door een voorbehandeling van roosteren (Zie 3.1 Voorbehandeling).

Als laatste is ook de chemische samenstelling van het ganggesteente belangrijk. Dit ganggesteente, dat voornamelijk bestaat uit  $\text{SiO}_2$  in combinatie met  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (en in mindere mate  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  en  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), vormt in aanwezigheid van ijzeroxide ( $\text{FeO}$ ) en toegevoegde warmte de slak (grotendeels bestaande uit fayaliet  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ , wüstiet en glas). Deze slak werkt als een vloeimiddel, een flux. Het vervoert de ijzerdeeltjes en zorgt voor de accumulatie ervan die dan resulteert in de wolf (het ruwe ijzer) (Joosten 2004, 11). Meestal is een erts “zelf-vloeiend”, wat er op neer komt dat de ganggesteente en de ijzeroxides in de juiste stoichiometrie zijn om een slak te vormen. Indien dit niet het geval is, kan een flux worden



toegevoegd onder de vorm van kalk (kalksteen, schelpfragmenten, ... ) of gerecycleerd slakmateriaal (Pleiner 2000, 137; Joosten 2004, 11) (zie 3.2.1 Directe proces: de Laagoven).

Hoewel er vele soorten ijzerertsen aanwezig zijn in de aardkorst, beperken we ons hier tot het bespreken van degene die in het studiegebied worden/werden aangetroffen.

Goethiet ( $\text{FeO}\cdot\text{OH}$ ) is een ijzerhydroxide dat over de hele wereld voorkomt als verweringsproduct van pyriet, hematiet of magnetiet, en bevat tot 60% Fe. Limoniet ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), ook wel *Brauneisenstein* genoemd vanwege zijn kleur, is een verzamelnaam waar men de cryptokristalijne varianten van goethiet mee aanduidt. Beide mineralen komen onder de vorm van ijzeroer of moerasijzererts en ijzerzandsteen voor in het studiegebied.

Het moerasijzererts vormt zich bij de neerslag van limoniet. Het ijzer ontstaat door de verwerking van pyriet of marcassiet, dat in vele kleien voorkomt, maar voornamelijk door verwerking van glauconiet ( $\text{KMg}(\text{Fe},\text{Al})_3\text{Si}_6\text{O}_{18}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , waarbij ijzer vaak al het aluminium vervangt). Het grondwater voert het ijzer in opgeloste toestand af, waarna het zal neerslaan in lagere gelegen gebieden waar de grondwatertafel dicht bij de oppervlakte ligt, zoals veenachtige gebieden of moerassen (meersen en broeken). Dit neerslaan gebeurt boven de grondwaterzone, in de schommelzone waar oxido-reductietoestanden optreden (Gullentops & Wouters 1996, 88, 150). Het geoxideerde ijzer komt voor als dunne laagjes, of als ware ijzerbanken die tot een halve meter dik kunnen zijn (van Duijvenvoorde 2006, 90).

Het ijzerzandsteen werd minder frequent aangewend voor ijzerproductie vermits deze vaak een ijzergehalte heeft van niet meer dan 10 - 20% (Pleiner 2000, 89). Als bouwmetaal is het echter een nog steeds gegeerde delfstof (Gullentops & Wouters 1996, 88-89).

In het Zoniënbos zijn sporen aangetroffen die aantonen dat dit erts werd ontgonnen voor ijzerproductie. Het gaat om het erts in de ijzerzandsteenbanken van het Lediaans Tertiair substraat, die quasi dagzomen. Door de uitzonderlijke afwezigheid van erosie onder het bosbestand, konden verschillende stappen van de *chaîne opératoire* worden herkend, zoals erts- en houtskoolontginning, de voorbehandelingen van het erts en het reductieproces (zie *infra*) (Langohr & Pieters 2006, 158 - 159).

Los van deze twee kwalitatief sterk variabele ertsen, is het studiegebied tijdens de middeleeuwen vooral afhankelijk van importproducten. Zo kon Zuid-Luxemburg en het gebied tussen Samber en Maas met hun rijke ijzerertslag Vlaanderen deels in zijn behoefte

voorzien. Andere gebieden zijn in dit opzicht ook relevant om te vermelden, deze worden besproken in *Deel III*.

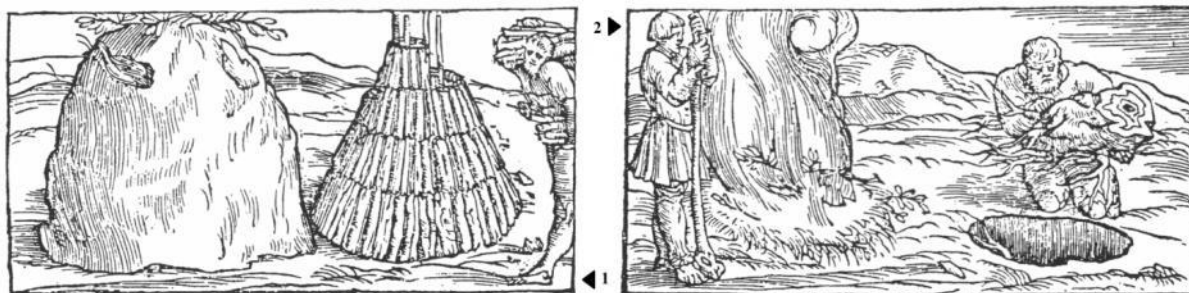
## 2. Brandstof

### 2.1. Houtskool

Een goede brandstof is essentieel voor de ijzerproductie en -extractie. Aangezien hout, zelfs wanneer gedroogd, nog 10 tot 20% aan vocht bevat, zal dit, mede door vele andere stoffen (teer, gassen, ...), de verbrandingstemperatuur aanzienlijk verlagen. Tevens zal de temperatuur bij de verbranding nooit constant en dus moeilijk te controleren zijn, wat een vereiste is voor smidshaarden en laagovens.

Houtskool heeft deze nadelen niet en zal daarom gebruikt worden. Het product wordt bekomen door een proces van langzame verbranding onder zuurstofarme omstandigheden. Naast een constante temperatuur zal de houtskool een bron leveren van bijna pure koolstof (afhankelijk van het hout: 78 - 92% koolstof). Deze wordt door verbranding in de laagoven omgezet naar CO, die op zijn beurt een sleutelfunctie heeft bij de reductie (Zie 3.2 Reductieproces).

In het geval van kleine ijzerproductieplaatsen werd, wanneer de omstandigheden het toelieten, de houtskool in de nabije omgeving gemaakt. Het proces van houtskoolbranden wordt o.a. beschreven in *Pirotechnia* van Vannoccio Biringuccio uit 1540 (Smiths 1959). Hij beschrijft zowel de methode van de *Platzmeiler* (een kegelvormige houtmijt), als het houtskoolbranden in een kuil (*Grubenmeiler*) (Figuur 1). Naast deze twee types bestaat nog de *Langmeiler*, een lange rechthoekige meiler opgebouwd tussen twee houten staketsels (Boeren *et al.* 2009, 16). De *Platzmeiler* wordt opgebouwd rond een centrale staak, waarrond hout wordt gestapeld. De diameter van de meiler kan tot 10m breed zijn, en meestal ca. 3m hoog. De stapel wordt afgedekt met een laag rijshout en wordt dan met plaggen afgedekt (voorzien van enkele luchtgaten om een minimum aan zuurstof te garanderen). Het geheel wordt ontstoken en brandt enkele dagen tot een week lang (Boeren *et al.* 2009, 17). Dit principe is geldig voor de drie types.



Figuur 1: 1. Platzmeiler, 2. Grubenmeiler; uit Smiths 1959, De la Pirotechnia III. 173.

Sporen van zulke houtskoolmijters kunnen nog in het landschap zichtbaar zijn wanneer het loopvlak ongestoord bleef. Dit is het geval voor het Zoniënbos, waar kleine heuvels, bestaande uit donkere aarde en kleine houtskoolfragmenten, werden onderzocht (Langohr & Pieters 1996, 158-159). Rond de heuvel is een sikkelvormige kuil waarneembaar, gegraven om de mijter met zoden en aarde te bedekken.

Op de opgraving Kluizendok, Evergem, werden vermoedelijk enkele van deze meilers aangetroffen daterend uit de Volle Middeleeuwen. Anthracologisch onderzoek wees uit dat het houtskool voornamelijk afkomstig was van eik (Deforce, Boeren 2009), een houtsoort met voordelige eigenschappen m.b.t. het reductieproces. Berkenhout werd dan weer gunstig bevonden door de (zilver- en) ijzersmeden vanwege de geringe rook die het produceerde. Haagbeuk leverde eveneens een uitstekende houtskool (Van den Brecht 2005, 244, 247).

Er vindt een reductie in volume (50 – 60%) en gewicht (tot 75%) plaats tijdens de omvorming van hout naar houtskool. Pleiner (2000, 118) berekende dat 8 tot 10 gewichtseenheden houtskool nodig zijn om één eenheid ijzer te produceren. Hieruit kunnen we afleiden dat de ijzerproductie zeer zwaar doorwoog op het bosbestand.

## 2.2. Steenkool

Andere brandstoffen dan houtskool werden zelden gebruikt voor de ijzerproductie. Tylecote (1962, 233-234) haalt aan dat, voornamelijk voor de Romeinse periode, vele sites met archeologisch bewijs van een smidse, sporen van steenkool vertonen. Het is perfect mogelijk dat steenkool gebruikt werd tijdens het reductieproces, zo werd bijvoorbeeld de Chinese ijzerproductie vanaf de Han-dynastie (ca. 200 v.C. – 200 n.C.) voornamelijk gevoed door, weliswaar behandelde, steenkool (Pleiner 2000, 129). Zuivere steenkool kon niet gebruikt worden in de ijzerproductie door de aanwezigheid van zwavel en teer (Stroobants 1978, 106).

In Europa, zowel voor de Romeinse periode als de middeleeuwen, lijkt het er op dat steenkool voornamelijk gebruikt werd als brandstof voor de smidshaard, iets wat bevestigd wordt door een geschreven bron uit Nottingham, Engeland, daterend uit 1257 (Schubert 1957, 114; Pleiner 2000, 129).

De overschakeling naar de steenkool (onder de vorm van cokes) vanaf de 18<sup>e</sup> eeuw werd voornamelijk gevoed door de economische voordelen van de brandstof.

### **2.3. Andere**

Bewijs voor het gebruik van turf of veen dat als brandstof voor de laagoven werd gebruikt, komt uit prehistorisch en vroegmiddeleeuws Schotland (Pleiner 2000, 130). De turf onderging eerst een procedure gelijkaardig aan de productie van houtskool vooraleer het gebruikt werd. Er is geen bewijs voor het gebruik van turf in de context van ijzerproductie of -bewerking in huidig Vlaanderen.

Ten slotte zijn er nog vorsers die, vooral voor Scandinavië, het gebruik van hout als brandstof (met een transformatie naar houtskool in de laagoven zelf) niet uitsluiten (Espelund 2011, 87).

### 3. Reductie van het mineraal

#### 3.1. Voorbehandeling

Vooraleer het erts bruikbaar was in het reductieproces, moest ze enkele voorbehandelingen ondergaan. De eerste stap was het wassen van het erts om de aanklevende minerale fractie weg te spoelen. Wanneer zand of klei in de oven belandde, werd deze wel afgevoerd met de slak, maar dit kostte op zijn beurt meer brandstof, wat uiteraard vermeden diende te worden. De aanwezigheid van een waterstroom nabij het ontginningsgebied is dus aangewezen. Archeologisch is dit proces zichtbaar door sporen van zand- of kleiophopingen (Langohr, Pieters 1996, 159).

Een volgende stap was het roosteren. Het erts werd hiervoor verspreid op een open vuur (droog hout kon hiervoor worden gebruikt) en werd blootgesteld aan temperaturen van ca. 200 tot 800°C (Pleiner 2000, 107). Dit proces had verschillende redenen. Het zorgde ervoor dat het vocht uit het erts werd gedreven, alsook dat het poreuzer werd waardoor men ze gemakkelijker kon breken (kleine stukken, met een typische afmeting ter grootte van een walnoot, konden immers efficiënter gestapeld worden in de laagoven en hadden tevens een groter reductieoppervlak) (Sim & Ridge 2002, 44-46). Een andere reden voor het roosteren is de chemische omvorming naar oxides, de gegeerde chemische vorm van het erts. Dit was vooral nodig bij ertsen van de groep carbonaten (zoals sideriet) en sulfiden (zoals pyriet), maar het werd ook toegepast bij (hydro-)oxiden om de hierboven beschreven redenen (Pleiner 2000, 107-108). Het chemisch proces wordt duidelijker met enkele voorbeelden:

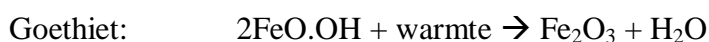
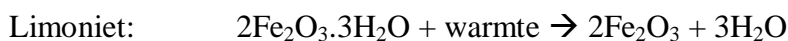


We zien dat sideriet werd omgevormd naar een oxide met dezelfde chemische formule als hematiet. Dit erts kon niet succesvol worden gereduceerd zonder deze tussenstap. Hetzelfde kan worden aangetoond wanneer een sulfide wordt geroosterd:



We zien dat het zwavel volledig uit de chemische formule verdwijnt. In de praktijk bleef er echter nog een kleine hoeveelheid aanwezig in de slak, die, wanneer het ijzer werd gesmeed bij een temperatuur die 1000 °C overschrijdt, het materiaal broos en breekbaar maakte. Om deze reden werd het erts niet vaak gebruikt (Pleiner 2000, 108).

Goethiet en limoniet dienden in principe geen voorbehandeling van roosteren te ondergaan. Agricola (1559, IX, XII) maakt in zijn boek *De Re Metallica* hier ook geen vermelding van, waardoor we kunnen veronderstellen dat het roosteren geen standaardproces was (Van Den Bosch 2004, 9). De chemische reactie ziet er dan als volgt uit:



Het archeologisch bewijs voor roosteren op de reductiesite zelf komt in vele gevallen enkel voor onder geroosterde ertsen, zodat Tylecote (1962, 221) suggereert dat het proces niet op de site zelf plaatsvond, maar op een kleine afstand daarvan. Pleiner (2000, 109) bepleit echter dat vele roosterplaatsen zich meestal op het loopvlak bevonden, waardoor ze meestal niet bewaard bleven.

Het eerder vermelde onderzoek van de RUG tussen 1979 en 1981 in het Zoniënbos toonde enkele van deze roosterplaatsen (Langohr, Pieters 1996, 158). Hier werden zeven clusters waargenomen die elk een eenmalig gebruik kenden. Ze bestonden telkens uit een restant van een *Platzmeiler* (zie *infra*), twee kleine zones met concentraties van ijzerslakken, en een zone die een verbranding van de lemige bovengrond vertoont. Dit laatste spoor wordt met het roosteren in verband gebracht, en dateert van voor 1371, aangezien vanaf dan het beheersboek van het Hertogelijk Bos werd opgemaakt (zgn. *Cuerboeck van Zoniën*), en deze geen gewag maakt van ijzerproductie (Langohr, Pieters 1996, 159).

Meer permanente roosterplaatsen konden in de vorm van ovens voorkomen, met een grote verscheidenheid aan vormen en grootte, variërend van site tot site (Pleiner 2000, 110-113).

### 3.2. Reductieproces

Dit proces beschrijft de overgang van het mineraal naar het metaal. Het doel is het ingesloten ijzer in het erts te scheiden van de andere elementen.

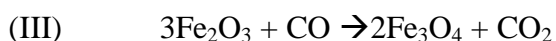
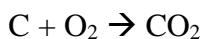
De techniek die nodig was om het ijzer te bekomen is complexer dan bij de meeste non-ferrometalen. De moeilijkheid lag niet onmiddellijk in de hoge smelttemperatuur van het metaal (1536 °C), maar in het reductieproces. Zoals vermeld komt ijzer voor als oxide (zie 1. Erts), maar in vergelijking met tin, dat eveneens als oxide voorkomt, is de reductie van het

erts moeilijker omdat het veel sterkere reducerende omstandigheden vereist (Tylecote 1962, 183).

In chemische termen is het doel van het reductieproces om de ijzeratomen vrij te maken van andere oxiden en aangehechte zuurstofatomen. Om dit te bekomen is er een bepaalde energie (onder de vorm van warmte) en een reductor nodig. Het is koolstofmonoxide, CO, afkomstig van de verbranding van de houtskool, dat hier optreedt als reductor. Het is een element dat zeer sterk wil binden met een zuurstofatoom, waardoor het een zuurstofatoom van het geoxideerde ijzer naar zich toe trekt (Pleiner 2000, 133).

Reductie als chemische vergelijking (naar Pleiner 2000, 131-136; Sim, Ridge 2002, 43; Tylecote 1962, 188) (zie Figuur 2):

De zuurstof bindt zich, met toevoeging van energie, met koolstof om zo koolstofdioxide te vormen (I). Op zijn beurt bindt het koolstofdioxide met koolstof, en vormt zo de reductor koolstofmonoxide (II). De koolstofmonoxide is bij temperaturen vanaf 700 - 800°C in staat om een zuurstofatoom weg te trekken van het erts, hier hematiet, en vormt zo koolstofdioxide en magnetiet (III).



Het magnetiet wordt wederom gereduceerd naar wüstiet (IV). Als laatste wordt het wüstiet gereduceerd naar metallisch ijzer (V).



Er worden twee processen onderscheiden, het directe en het indirecte proces (respectievelijk de laagoven, *Bloomery furnace* [Eng.], en de hoogoven, *Blast furnace* [Eng.]). Beide zijn gebaseerd op dit proces van reductie van het mineraal.

### 3.2.1. Directe proces: de Laagoven

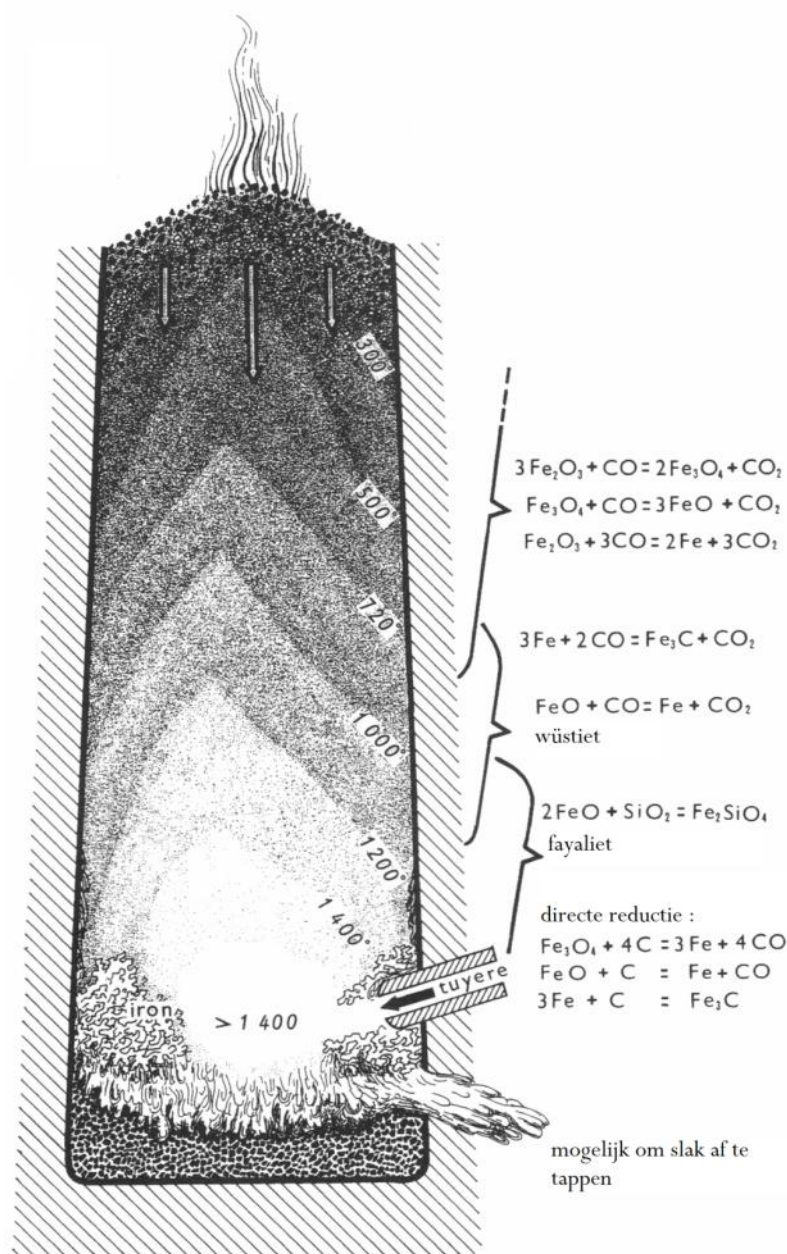
Hoewel veel verschillende types laagovens voorkomen, komt het structureel gezien meestal hier op neer: de laagoven is een cilindrische schoorsteen uit klei of baksteen met een typische hoogte van 1 – 1.5 m, en 40 tot 80 cm diameter aan de basis (zie Figuur 2). De wanddikte was om en bij de 20 cm, en dit om warmteverlies te beperken (Bayley *et al.* 2001, 10). In deze schouw werden afwisselend lagen met houtskool en ijzererts gestapeld. Onderaan was de oven voorzien met een tuyère, een luchtpijp die diende voor de luchttoevoer, en, afhankelijk van het type oven, een opening waar de slak kon worden afgetapt.

In de laagoven speelt zich het hierboven beschreven proces van reductie af. Kenmerkend aan deze oven is dat het smeltpunt van het ijzer (1538°C voor zuiver ijzer) niet wordt bereikt. Het metallisch ijzer en de ongewenste restmineralen (het ganggesteente) worden van elkaar gescheiden wanneer de temperatuur ca. 1176 °C overschrijdt. De gang wordt dan vloeibaar en vormt een slak, bestaande uit een mengsel van ijzeroxide en silica (= fayaliet,  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ), restmineralen en as (Tylecote 1962, 183).

De ijzermassa, die de (ijzer-)spons of wolf wordt genoemd, blijft bij deze temperatuur nog in vaste of sponsachtige toestand, en kan naderhand uit de oven verwijderd worden (Schuerman 1996, 184). Het ijzer bevat een gering percentage aan koolstof waardoor het, mits een voorgaande raffinage (zie 4.1 Raffinageproces), klaar is voor het smeden.

Het smeltpunt van de slak kon worden verlaagd door de toevoeging van een flux. Kalk ( $\text{CaO}$ ) wordt vaak vernoemd in deze context, en kalksteen gevonden in de nabijheid van een laagoven wordt door vele archeologen meestal met het productieproces in verband gebracht (Pleiner 2000, 136). De flux zou er tevens voor zorgen dat het overgebleven ijzer in de slak (onder de vorm van ijzeroxide) vervangen wordt door calcium, waardoor een hogere opbrengst mogelijk was. Tylecote (1962, 187) en Pleiner (2000, 136) twijfelen echter sterk aan de voordelige functie die het kalk wordt toebedeeld in context van de laagoven. De temperaturen in de oven zijn te laag om kalk te laten opnemen in de slak. Hiervoor zijn temperaturen rond 1600°C nodig die enkel in de hoogoven worden bereikt. Wat wel vaststaat is dat de smelttemperatuur van de slak tot 60°C kan dalen door de toevoeging van kalk. Dit is vooral van toepassing bij silicium-rijke ertsen waarbij de slak een hogere smelttemperatuur zal hebben (Gullentops & Wouters 1996, 151).





Figuur 2: Schematische voorstelling van een laagoven (aftapoven), met de rechts het proces van chemische reductie; uit Pleiner 2000: 134, fig. 33.

### 3.2.2. Indirecte proces: De Hoogoven

De beginselen van het indirecte proces in Europa wortelen in de 13<sup>e</sup> – 14<sup>e</sup> eeuw, maar het kent zijn echte bloei pas vanaf de 18<sup>e</sup> eeuw, waardoor er in deze verhandeling slechts in mindere mate aandacht aan zal worden besteed.

Dit is de technologie die vandaag de dag nog wordt gebruikt voor de productie van ijzer. Het erts wordt samen met cokes en kalk in een oven gestapeld en opgewarmd. In tegenstelling tot houtskool, die in de laagoven werd gebruikt, zijn cokes sterker waardoor ze een groter

gewicht kunnen dragen, met een grotere stapelcapaciteit als gevolg (Joosten 2004, 27). Temperaturen van 1600 – 2000 °C worden bereikt, en het ijzer overschrijdt zijn smeltpunt. Het vloeibare ijzer neemt in deze aggregatietoestand door het directe contact met de brandstof veel koolstof op (tot 5% C), waardoor het resultaat, ruwijzer, sterk gecarboniseerd zal zijn. Dit ruwijzer (*Pig iron*) is zeer broos, hard en moeilijk buigbaar, waardoor het niet geschikt zal zijn om te smeden of voor andere bewerkingen. Om smeedijzer (*wrought iron*) of staal te bekomen, moet het tussenproduct een tweede behandeling van oxidatie ondergaan om het percentage koolstof te verminderen tot 0.05 – 1.5 % (vandaar de naam “indirecte proces”) (Pleiner 2000, 131; Rees 1968, 179).

## 4. Bewerking

### 4.1. Raffinageproces

Het ijzer uit de laagoven kon nog niet direct gebruikt worden door de smid. Het bestond uit een ruw aaneengesinterd, porreus conglomeraat van ijzer, doordrongen met slak- en houtskoolinclusies, die de wolf of spons werd genoemd (Schuerman 1996, 184).

Volgens enkele historische bronnen daterend uit de 16<sup>e</sup> tot 19<sup>e</sup> eeuw werd de wolf nadat het uit de laagoven was verwijderd direct behamerd met houten hamers - dit om het broze ijzer niet te breken - om de slak tussen het ijzer al deels te verwijderen (Pleiner 2000, 215). Verdere behandeling was echter nodig. Zo moest de wolf nadien verschillende malen worden herverhit tot een temperatuur van ca. 1200°C, zodat de slak in vloeibare vorm uit het ijzer kon worden gehamerd (Sim & Ridge 2002, 65). Ondanks dit intense proces van verhitten en hameren bleef er steeds een geringe hoeveelheid verontreiniging van slak in het ijzer aanwezig. Tijdens het smeden manifesteren deze zich als langgerekte dunne inclusies, maar deze hebben desondanks geen nefaste gevolgen voor de mechanische sterkte van het materiaal. Integendeel, de inclusies maken het vuurlassen gemakkelijker omdat ze, wanneer verhit, het ijzer een deklaagje geven die de las beschermt tegen oxidatie (Joosten 2004, 15).

### 4.2. Smeden

De voornaamste functie van de smid bestond erin het metaal vorm te geven door het koud of warm te bewerken. Door het metaal op te warmen bij temperaturen groter dan ca. 900°C (de temperatuur is afhankelijk van de ijzer-koolstofverhouding van het metaal), kan de vorm en structuur vrij gemakkelijk gemanipuleerd worden. Ook de fysische eigenschappen van het ijzer konden door de smid worden gewijzigd in functie van het gebruik. Deze eigenschappen

waren enerzijds inherent aan het soort metaal (vnl. het percentage koolstof aanwezig in het staal), maar konden anderzijds ook gemanipuleerd worden door het toepassen van enkele warmtebehandelingen zoals *gloeien*, *carboniseren*, ... (Pleiner 2006, 66-69).

## 5. Archeologische zichtbaarheid ijzerproductie en –bewerking

### 5.1. Ovenstructuur

Laagovens zijn over het algemeen slecht bewaard aangezien men de bovenstructuur meestal afbrak om de ijzerspons te verwijderen. Zodoende blijft, in het gunstige geval, enkel de basisstructuur bewaard, dewelke morfologisch vaak te verwarren valt met een gewone haard (Schuerman 1996, 184). Vaak zijn wel wandfragmenten van de schouw terug te vinden. Deze bestaat uit een meestal organisch verschraalde klei (maar ook zand- of steenverschraling) en werd aan zeer hoge temperaturen blootgesteld (>1400°C). De klei kon, naargelang de hitte, bakken, verbranden en verglazen (zie Figuur 3). Deze fragmenten van *furnace lining* kunnen voorkomen in zowel smeed- als smeltovens.



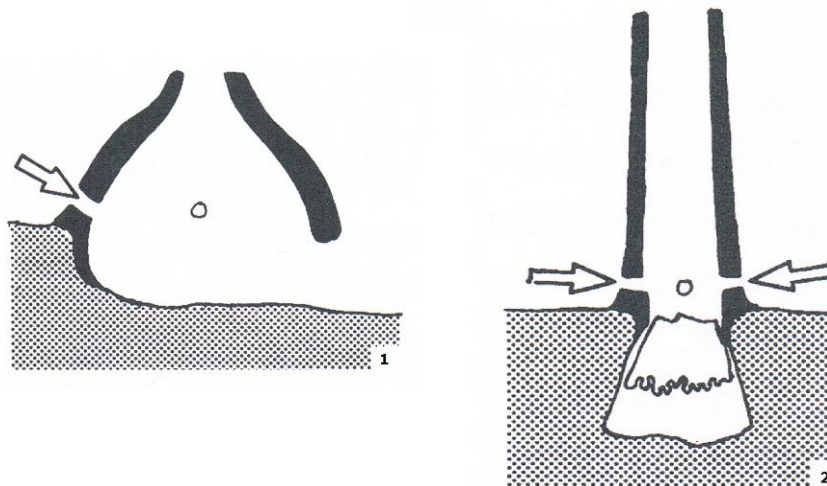
Figuur 3: De bovenzijde van een verglaasde (smeed)ovenwand/*furnace lining*. (Melsele-Brielstraat spoor 54 (mls\_ws\_1))

Vanaf de intrede van ijzer in onze gebieden ca. 800 – 700 v.C. zijn er verschillende types laagovens gebruikt. Naar Joosten (2004, 12-15) en Pleiner (2000, 141-195) kunnen we onderscheid maken tussen ingegraven structuren enerzijds, en structuren opgeworpen boven het grondniveau anderzijds. De evolutie van de ovens kenmerkt zich telkens door een verbetering in ijzeropbrengst en efficiëntie van het proces.

De kuiloven (*bowl furnace*) is de vroegste vorm van oven. Ze werd gedurende de gehele ijzertijd gebuikt in Europa, en bestaat uit een 20 tot 100cm uitgegraven cirkelvormige kuil met een diameter van 30 tot 100cm (Joosten 2004, 12). Een tweede type was de *dug-in furnace*, dewelke voornamelijk in Centraal-Europa gebruikt werd vanaf de 5<sup>e</sup> eeuw v.C.. Het

verschil met de kuiloven is dat dit type een vrije opening aan de voorzijde had om luchttoevoer te verbeteren, en dat ze meestal kleiner werd uitgevoerd (ca 20 – 35 cm in diameter).

Er zijn drie types te onderscheiden die op het grondniveau werden uitgewerkt: de koepeloven (*domed furnace*), slakkuiloven (*slak pit-furnace*) en de aftapoven (*slag tapping furnace*). De eerste twee types werden gebruikt vanaf het midden van de ijzertijd tot respectievelijk de Romeinse tijd en vroege middeleeuwen (Joosten 2004, 13) (zie Figuur 4).



Figuur 4: Voorbeelden van vroege laagovens. 1. Domed furnace: Unterpullendorf, Duitsland; La Tène. 2. Slak pit-furnace: Scharmbeck, Duitsland; Romeinse periode. De pijlen duiden de luchttoevoer aan. Uit Pleiner 2000, 273: figuur 73.

De laatste en belangrijkste voor de volle en late middeleeuwen is de aftapoven (zie Figuur 2). Deze ovens werden reeds gebruikt vanaf de Keltische periode en werden vrij algemeen toegepast vanaf de Romeinse periode in Montagne Noir in Frankrijk, de Weald en The Forest of Dean in Engeland (Schuerman 1996, 187; Joosten 2004, 26).

De hoogte van deze structuren is moeilijk te reconstrueren, maar was vermoedelijk ca. 100cm hoog. De diameter varieerde tussen de 25 en 50cm (Joosten 2004, 13).

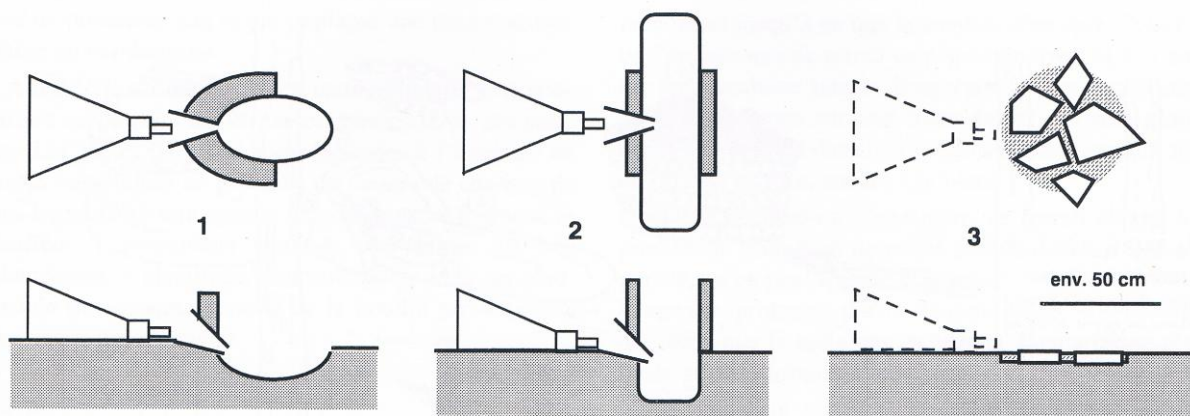
Het voordeel van dit type is dat de slak kon worden afgetapt, wat het mogelijk maakte om de oven tijdens het proces bij te vullen met afwisselend houtskool en erts. Ook de wolf zou veel minder verontreinigd zijn met slakresten zodat het raffinageproces gemakkelijker verliep (Crew 1996, 1).

Vanaf de late middeleeuwen werd ook de hoogoven ontwikkeld. Deze kwam voornamelijk voor in gebieden die een groot aanbod aan grondstoffen hadden en een intensieve ijzerproductie kenden. Dit is niet van toepassing voor het studiegebied.

## 5.2. Smeedhaard

Smeedhaarden zijn archeologisch meestal minder goed zichtbaar, omdat ze geen opvallende karakteristieke kenmerken hebben. Het enige wat nodig was, was een brandstof en een luchttoevoer. Het verwarmen van het ijzer kon bijvoorbeeld gedaan worden in een gewone open haard. Moderne smeedhaarden komen op heuphoogte, een gebruik dat al vanaf de Romeinse periode gekend is via iconografische en geschreven bronnen (McDonnell 1995).

Een smeedhaard kon echter ook uitgegraven zijn, waardoor ze archeologisch meer vatbaar is (zie Figuur 5). In dit geval werd een kuil gegraven met een diameter van 25 tot 100 cm en 10 – 30 cm diep (Serneels, Feugère 1998, 29). Ook ovale of rechthoekige vormen met vergelijkbare afmetingen kunnen voorkomen, afhankelijk van welke soort objecten er op de site werden verwerkt (lange ijzeren staven t.o.v. kleine objecten). De wanden bestonden uit ruw verschraalde klei (vgl. ovenstructuur), en beschermden de blaasbalg.



Figuur 5: Drie mogelijke voorstellingen van een open smeedhaard. 1. ovale kuil met zijdelinkse luchttoevoer. 2. Vierkante kuil met laterale luchttoevoer (om langere objecten te verwarmen). 3. Een (met stenen versterkte) open haard met of zonder luchttoevoer. Uit Serneels, Feugère 1998, 28: figuur 21.

## 5.3. IJzer en slak

### 5.3.1. Wolf/Loupe/spons

De wolf is het sponzige ruwe ijzer dat overblijft na de reductie. Het vormt zich net onder de luchtinlaten (tuyères) door de accumulatie van ijzerdeeltjes. Het product is nog niet werkbaar vanwege de vele houtskool- en slakinclusies, en dient eerst een eerste smeedproces te ondergaan (zie Deel I: 4.1 Raffinageproces) (Joosten 2004, 15).

Het is moeilijk om dit materiaal als dusdanig te interpreteren, het bestaat immers nog vaak uit een hoog percentage slak. Zo is het gemakkelijk te verwarren met de plano-convexe bodemslakken (PCB, zie *infra*) uit de smeedhaard. Deze bevatten immers ook (kleine)

deeltjes metallisch ijzer, waardoor onderscheid soms pas na microscopische of chemische analyse duidelijk wordt (Pleiner 2000, 230). Historische bronnen maken vermeldingen van dit materiaal, maar zijn niet beschrijvend (Serneels, Feugère 1998, 21).

De ijzerwolf is grillig van vorm met inclusies van slak en houtskool. Wanneer aangetroffen tijdens een archeologische opgraving zijn ze vanzelfsprekend bedekt met een oxidatielaag die de vorm verbergt. De schijnbare dichtheid van de wolf is lager dan die van het ijzer door de inclusies en hoge porositeit (Serneels, Feugère 1998, 22).

De vondst van een ijzerwolf wil niet meteen zeggen dat men met een productiesite te maken heeft. Dit materiaal werd ook in bulk verhandeld, zoals uit het 15<sup>e</sup>-16<sup>e</sup> eeuwse gezonken vrachtschip op de rivier Salzach, nabij Bergheim, Oostenrijk, aantoon. Dit transporteerde (naast ruwe marmeren platen) een 120-tal ijzerwolven, goed voor een totaalgewicht van 300 kg (Pleiner 2000, 242). Naast ijzerwolven werd het metaal ook als afgewerkte staven verhandeld.

Het gewicht en de vorm van deze ijzerwolven kan sterk veranderen doorheen de tijd, afhankelijk van het productieproces (direct *versus* indirect) en graad van innovatie in het proces (vnl. het toepassen van waterkracht). Het gemiddeld gewicht lag, op basis van onderzoek op 36 ijzerwolven verspreid over middeleeuws Europa (5<sup>e</sup> – 14<sup>e</sup> eeuw), voor de meerderheid van het materiaal slechts tussen de 1.6 en 3.3 kg. Een andere categorie die meer dan een kwart van de groep besloeg, had een gewicht tussen 8 en 14 kg. Uitzonderlijk worden ijzerwolven aangetroffen met een gewicht van bijna 50 kg (Pleiner 2000, 243-245).

Mogelijk zijn enkele van deze ijzerwolven slechts fragmenten van de totale opbrengst van de laagoven of al onderhevig geweest aan de eerste stages van raffinage. De wolf verliest immers 40 tot 80% van zijn gewicht bij dit proces (Pleiner 2000, 245; Serneels, Feugère 1998, 32). Dit kan het verschil verklaren tussen deze gewichten en deze die Tylecote (1987) voor de late middeleeuwen vermeldt. Hij spreekt, gebaseerd op historische bronnen, van gewichten rond de 80 kg en meer.

Hoewel het vondstmateriaal voor onze streken zeer schaars is, is het de eerste categorie die te verwachten valt, met de beperkte omgevingsfactoren (afwezigheid van goede erts) in gedachte. Zwaardere exemplaren kunnen voorkomen, maar dan gaat het, zeker voor de (post-) middeleeuwse periode, zeer waarschijnlijk om verhandeld materiaal.

Vermeld moet ook nog worden dat er in de periode vanaf de 9<sup>e</sup> eeuw, in sommige delen van Europa ijzerwolven voorkomen met een diepe V-vormige inkervingen, gevormd door het slaan van een wig of bijl in de hete wolf. De reden hiervoor is hoogstwaarschijnlijk om de kwaliteit en de hoeveelheid slak in het ijzer te bepalen (Pleiner 2000, 245). Dit gebruik wordt echter door geen enkele vondst gestaafd voor het studiegebied.

### **5.3.2. Slak**

Slakken zijn een frequent voorkomende vondstcategorie bij archeologische opgravingen, zowel op rurale als urbane sites. Ze vormen een zeer belangrijk aspect in de studie van metallurgie, en hebben ook belangrijke implicaties voor economische, ecologische en sociale interpretaties van de site. Daar dit vondsttype quasi het enige bewijs is dat overblijft van metaalbewerking, wordt er in deze verhandeling extra aandacht aan besteed.

De slak is een afvalproduct van zowel ijzerproductie als -bewerking. Naast deze soort komen de slakken ook tot stand bij verschillende andere (metallurgische) activiteiten, zoals bij de koper(legering)productie. Bij aardewerkproductie kunnen ook (keramiek)slakken worden gevormd die morfologisch vrij gelijkaardig zijn aan metaalslakken. Naast het gewicht verraadt een chemische analyse de quasi volledige afwezigheid van ijzer in deze slakken. Enige voorzichtigheid is dus wel op zijn plaats bij het lezen van archeologische rapporten die ijzerslakken vermelden.

Het is belangrijk om enkele karakteristieke eigenschappen van de verschillende types te belichten, om in het veld eventueel een eerste analyse te kunnen doen. Het is echter niet evident om onderscheid te maken tussen de types; dit is wel cruciaal in de interpretatie van de site. Een macroscopisch onderzoek van de slakken is dan ook maar het begin van elk archeometallurgisch onderzoek. Microscopisch onderzoek en chemische analyse zijn vereist indien men met zekerheid wil discrimineren. De chemische aspecten van de slak wordt beschreven in *Deel II: 2. Chemische samenstelling van de ijzerslak*.

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen productie- of reductieslakken, raffinageslakken en smeedlakken. De laatste twee worden ook wel post-reductieslakken genoemd (Pleiner 200, 216-217).



### 5.3.2.1. Reductieslakken

Een ijzerproductiesite is gekenmerkt door de aanwezigheid van een ijzererts, houtskool, ovenstructuren en/of wandfragmenten, ijzer en reductieslak. Van alle archeologische restanten is de slak het meest bestand tegen verwerking en zal dus ook het meest voorkomen.

De morfologie van de reductieslak is sterk afhankelijk van het type oven dat gebruikt werd, en daarnaast is ook de oventemperatuur en de chemische samenstelling van het ganggesteente van belang (Joosten 2004, 16). Naar McDonnell (1983) worden vier types onderscheiden: *furnace cooled slag*, *slag block*, *tapping slag* en de *cinder*. Allen worden gevormd in de laagoven tijdens het productieproces en hebben meestal een vrij homogene structuur (in tegenstelling tot smeedslakken, zie *infra*) voor het merendeel bestaande uit fayaliet, wüstiet en glas (van Duijvenvoorde 2006, 90).

De *furnace cooled slag* (FCS) vormt zich onderaan de oven, onder de wolf. In geval van een kuiloven is dit de volledige hoeveelheid slak die geproduceerd werd, terwijl de FCS bij een aftapoven de overgebleven slak betreft die niet is afgetapt (Figuur 6.4). Het heeft veelal een plano-convexe vorm en is grijs tot zwart in doorsnede. In tegenstelling tot het uniforme midden van de slak, is de onderzijde poreus en vesiculair. Resten van houtskool, erts en stukken ovenwand kunnen als inclusies voorkomen (Joosten 2004, 16).

De *slag block* (SB) is de typische slak van een kuiloven. Dit type wordt echter zelden aangetroffen op middeleeuwse opgravingen, vermits het gebruik van de oven vooral uit de ijzertijd en de daaropvolgende Romeinse periode stamt.

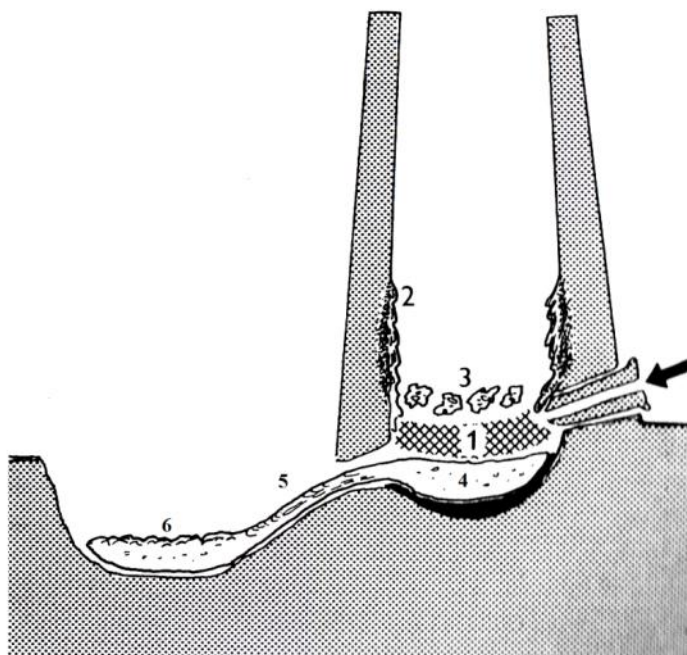
De slak accumuleert in de kuil die onderaan de oven gegraven is. Ze wordt veelal *in situ* aangetroffen, en kenmerkt zich door een sterke verticale vloeistruktuur. De afmetingen zijn afhankelijk van de grootte van de ovenstructuur, en variëren van 30 tot 80 cm in lengte, en 20 tot 50 cm in hoogte. Het gewicht blijft meestal beperkt tot 20 kg, maar er zijn voorbeelden gekend die van 100 tot bijna 500 kg gaan (Pleiner 2000, 259).

De *tap slag* of aftapslag (TS) (*scorie coulée*) is, zoals de naam doet vermoeden, het afvalproduct van de aftapoven (Figuur 6.5, Figuur 6.6). De slak werd tijdens het proces meerdere malen (eventueel op verschillende punten) afgetapt en heeft een zeer kenmerkende vloeistruktuur aan de bovenzijde van de slak. Aan de onderzijde tekent de grond zich in negatief af.

Ze worden meestal als gebroken stukken aangetroffen, verspreid over de site of in afvalkuilen en hebben een (donker)grijs, homogeen voorkomen. Hoewel de doorsnede een vrij vesiculaire structuur toont door het snelle afkoelen wanneer het de oven verlaat, voelt de slak niettemin solide aan (Pleiner 2000, 262). De afgetapte slak kon vloeien in een daarvoor bestemde kuil



naast de oven, en vormde daar een “*scorie coulée en forme de plaque-éventail*” (Pleiner 2000, 262) (zie Figuur 6.6).



Figuur 6: Schematische voorstelling van de aftapoven. 1. Wolf; 2. Verglaasde ovenwand met residu van slak, brandstof en erts; 3. Sinter; 4. Furnace coolde slag; 5. Tapslak; 6. Geaccumuleerde tapslak “*en forme de plaque-éventail*”. Uit Pleiner 2000, 258: figuur 67.

De *cinder*, of sinter, vormt de laatste categorie en is een conglomeraat van half-gereduceerde erts, brandstof, ertsfragmenten en slak. Ze hebben geen typische vorm, zijn breekbaar en hebben een lage dichtheid (Joosten 2004, 17; Figuur 6.3).

#### 5.3.2.2. Raffinageslakken

Raffinageslakken (*reheating slags*) zijn slakken die, vrij vanzelfsprekend, geproduceerd worden bij het eerste smeedproces of raffinageproces (*bloom smithing*).

Wanneer slakmateriaal, en met name de raffinageslakken, wordt onderzocht, kan het nuttig zijn om de termen primaire en secundaire productiesites te definiëren. Primaire productiesites zijn sites waar het ijzer werd geproduceerd en op zulke sites kunnen we sporen van voorbehandeling en reductie aantreffen, alsook het residu dat met deze productiestappen gepaard gaat. Secundaire sites zijn de sites waar geen spoor is van de productie zelf, maar waar het (geïmporteerde) ijzer werd verwerkt, zoals op een smidse.

Raffinageslakken zijn een type die zowel in primaire als secundaire productiesites kunnen worden aangetroffen. Het blijkt echter moeilijk om een onderscheid te maken tussen dit type slak en de smeedslak. Er bestaat onder auteurs dan ook geen echte consensus over morfologie

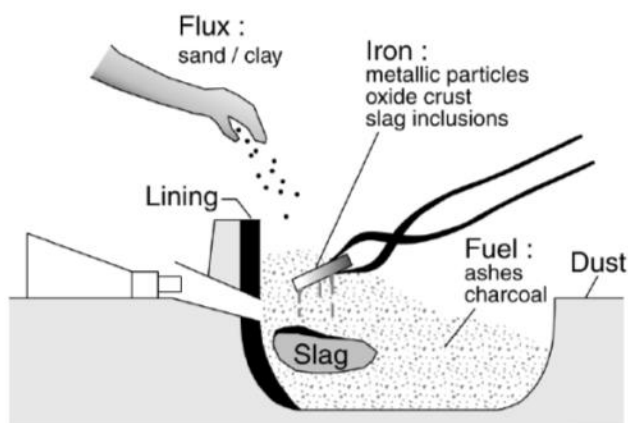
van de slakken, noch over de locatie van de productiestap (Van Den Bosch 2004, 98-99). Ze bevatten een grote hoeveelheid ijzeroxiden onder de vorm van wüstiet, fayaliet en minder frequent magnetiet (Pleiner 2000, 217). Restanten van reductieslak komen ook in de raffinageslak voor, en een chemische analyse die zich concentreert op deze fractie kan onderscheid maken tussen raffinage- en smeedslakken (zie *Deel II 2.2 Smeedslak*) (Serneels 1993, 77-78).

Zoals vermeld werden ijzerwolven ook als dusdanig verscheept en verhandeld, waardoor het proces van raffinage ook op een smidse ver weg van het productiecentrum kon plaatsvinden.

### 5.3.2.3. Smeedslakken

Het meest voorkomende afval gerelateerd met smeden en die met aantreft in de archeologische record zijn de zgn. *plano convex smithing hearth bottoms* (PCB). Deze komen op een archeologische site niet geïsoleerd voor, maar vaak in associatie met hamerslag (zie *infra*), onregelmatig gevormde slakbrokken, fragmenten van de haardwand, ... (Serneels, Perret 2003, 471).

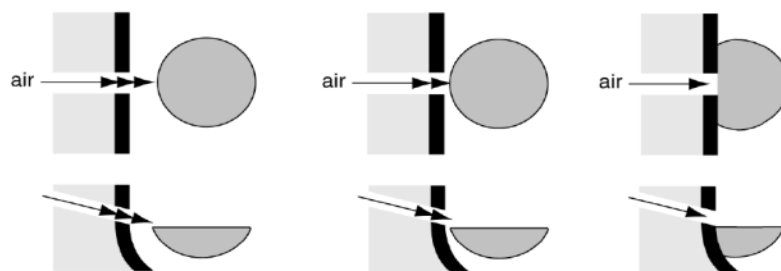
Deze plano-convexe slak komt vrij frequent voor over geheel Europa vanaf de vroeg ijzertijd tot en met de moderne tijd, en werd al in de jaren '60 in verband gebracht met het smeden.



Figuur 7: Schematische voorstelling van de vorming van de plano-convexe slak. Verschillende factoren hebben invloed op de samenstelling van de slak. Uit: Serneels, Perret 2003, 472: figuur 3.

De slak wordt gevormd in het warmste deel van de haard, voor de tuyère (Figuur 7).

De haard en de sterkte van de luchtstroom hebben ook een effect op de vorm van de smeedslak. Ze beïnvloeden het voorkomen van inclusies in de slak (brandstof en wandfragmenten), alsook de ellipticiteit en vlakheid (Serneels, Perret 2003, 473)).



Figuur 8: De invloed van haard en luchtstroom met betrekking tot positie van de PCB. Uit: Serneels, Perret 2003, 474: figuur 4.

De smeedslak onderscheidt zich vaak van de reductieslak door een vaak poreuze, sterk heterogene structuur. Fragmentjes metallisch ijzer zijn ook frequent aanwezig, waardoor de slak plaatselijk magnetisch kan zijn.

Naar Serneels en Perret (2003) worden de smeedslakken opgedeeld in drie categorieën, die elk aan bepaalde bewerkingen kunnen worden toegeschreven. Immers de aard van het materiaal is voornamelijk het resultaat van hoe het smeden gebeurde. De grootte en het gewicht daarentegen zijn onafhankelijk van de aard en hangen vooral af van de duur van het smeden (Serneels, Perret 2003, 475-476).

Een eerste groep bestaat uit de “*scorie grise dense*” (SGD). De “grijze dense slak” vertoont veel gelijkenissen met de reductieslak, in dat opzicht dat ze een grijze tot groene kleur hebben, en een relatief homogene en dense structuur kennen. De breuk is metallisch-grijs en bevat weinig poriën. De SGD is rijk aan ijzeroxide (voornamelijk uit warmteoxidatie van het metaal) en heeft een matige aanwezigheid van silicium (afkomstig van de wand, flux, as en stof). Hierdoor lijkt de activiteit van het bewerken bij zeer hoge temperaturen de meest evidente.

Een tweede groep zijn de SAS, “*scorie argilo-sableuse*”. Deze smeedslak is rijker aan silicium en andere elementen die gevonden worden in klei en zand (cf. de naam). Het heeft een laag gehalte aan ijzer(oxide), waardoor ze een lager gewicht hebben, en de glazige matrix kan nog kwartskorrels en verbrande klei bevatten (of afdrukken hiervan). Ze hebben vaak een lichte kleur (geelachtig, beige, bruin), maar kunnen ook blauw of groenachtig zijn. Dit soort slak wordt geassocieerd met bewerkingen waarbij een flux (vaak zand of klei) wordt gebruikt. Een flux wordt op het ijzeren werkstuk gestrooid waar het smelt en een glazige film vormt. Deze laag gaat oxidatie (ten gevolge van de hevige warmte) tegen door het metaal af te sluiten van de lucht. Een voorbeeld van zulke bewerking is (vuur)lassen.

Een laatste categorie is de “*scorie ferreuse rouillée*” (SFR). Deze is veel rijker in ijzer (metallisch, of als (hydr-)oxide) en bevat nog vaak hout- of steenkoolinclusies. De metallische component is vaak geoxideerd ten gevolge van de begraving, wat de SFR een sterk roestige kleur geeft. Deze slak kan onder andere gekoppeld worden aan het bewerken van slecht gecompacteerd ijzer die nog veel slak bevat en bewerkingen waar vuurlastemperaturen worden gebruikt. Het ijzer kan in dat geval gemakkelijker verbranden en zal dus accumuleren in de slak.

Een strikte verdeling tussen de drie groepen bestaat enkel wanneer er sprake is van weinig gevarieerd werk (dus het constant uitvoeren van hetzelfde soort werk met hetzelfde materiaal). Vaak echter is een PCB-slak een sequentie van verschillende bewerkingen. Typisch kan de onderzijde voor 90% bestaan uit SGD materiaal, wat overeenkomt met lange sessies van smeden om het ijzer vorm te geven. Een (geringe) aanwezigheid van SAS bovenaan de PCB-slak kan duiden op de afwerking van het object door er een beschermende film van zand op aan te brengen (Serneels, Perret 2003, 476).

#### **5.3.2.4. Hamerslag**

Hamerslag (*hammerscale*) valt niet onder de noemer slak, maar is een ander archeologisch relevant residu van ijzerbewerking. Deze wordt vaak in associatie gevonden met smeedslakken en -sporen. Het zijn kleine (typisch 1-3mm) schilfers van ijzeroxide/silicium die van het ijzer losraken door mechanische of thermische schok wanneer het ijzer wordt gesmeed (Starley 1995). Een andere vorm van hamerslag is de druppelvormige hamerslag (*spheroidal hammerslag*) die bestaat uit kleine slakdruppels die tot stand komen bij de raffinage van de wolf, of bij het vuurlassen, waar de flux van het ijzer wordt gedreven (Bayley *et al.* 2001, 14).

## **Deel II:   Onderzoek naar ijzerproductie en –bewerking**

## Inleiding

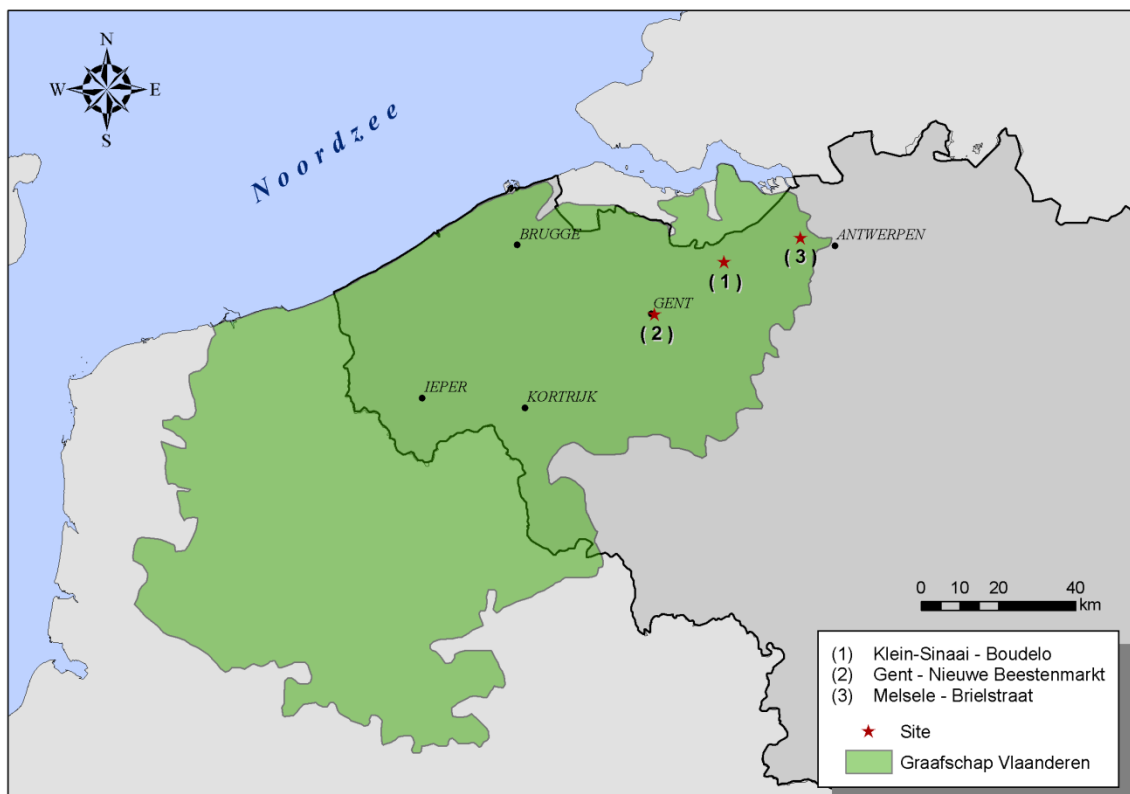
Ijzerslakken zijn onze primaire informatiebron inzake ijzerbewerking en productie. Middeleeuwse ovenstructuren blijven zelden bewaard aangezien ze zich vaak op het toenmalig - en dus huidig – loopvlak bevonden. De kuilovens uit de ijzertijd en Romeinse periode hebben een grotere kans op bewaring door de ingegraven slakkuil, maar worden in de middeleeuwen nog zelden gebruikt. Daarnaast is het resistente, stabiele karakter van de slak vaak ook de reden voor het frequent aantreffen van dit materiaal.

Er zullen drie middeleeuwse sites worden besproken die allen een opvallende hoeveelheid ijzerslakken vertonen. Het materiaal zal macroscopisch en chemisch worden geanalyseerd. De sites zullen als illustratie worden gebruikt om aan te tonen wat de mogelijkheden en beperkingen zijn met betrekking tot analyse van slakmateriaal, en hoe het kan bijdragen aan de interpretatie van een archeologische site. De sites die worden besproken zijn:

de laatmiddeleeuwse site nabij de abdij Boudelo te Klein-Sinaai, Stekene;

de Nieuwe Beestenmarkt, of het voormalige Sint-Baafsdorp te Gent;

de landelijke site te Melsele – Brielstraat, Beveren.



Figuur 9: De locatie van de drie onderzochte sites binnen de laatmiddeleeuwse grenzen van Graafschap Vlaanderen en de huidige grenzen van België. Kaart samengesteld in ENSI ArcMAP 9.3.

De vondstomstandigheid is, naast de aanwezigheid van het slakmateriaal, een ander iets waar de drie sites in overeenstemmen: het materiaal komt uit secundaire contexten, d.w.z. het slakmateriaal werd na de ijzerbewerking gedeponerd in afvalkuilen, waterputten of grachten. Ondanks de minder aantrekkelijke context, kan er niettemin veel informatie uit worden afgeleid. Daarbij komt nog dat dit materiaal op archeologische sites zeer vaak in secundaire contexten wordt aangetroffen, waardoor deze drie sites als vrij representatief kunnen worden beschouwd.

Gebaseerd op een interdisciplinair onderzoek van de site (archeologie, archeometallurgie, anthracologie, palynologie, ...) kan het mogelijk zijn om enkele belangrijke vragen betreffende de ijzerproductie op te lossen. Welk erts werd gebruikt, welke voorbehandelingen, wat was het type laagoven, efficiëntie van het proces, schatting van de productie... (Serneels, Perret 2003, 470). Ook op vragen met betrekking tot smeedactiviteiten kan de archeometallurgie antwoorden bieden, hetzij in mindere mate in vergelijking met ijzerproductie. Dit is te wijten aan het feit dat smeden een meer complexe en meer variabele activiteit is. Men kan zich inbeelden dat een smid zich specialiseert in één bepaalde bezigheid, bijvoorbeeld het omsmeden van baren naar zwaarden, of het maken van hoefijzers. Meer waarschijnlijk was de smid echter betrokken bij verschillende taken die frequent veranderden (grote/ kleine simpele/complexe objecten) en die een variabiliteit aan ijzer vroegen (hard staal, zacht ijzer, gerecycleerd staal, geraffineerd/ongeraffineerd, rijk aan fosfor/arm aan fosfor ...) waarop verschillende soorten bewerkingen werden toegepast (vuurlassen, warmtebehandelingen, ...) (Serneels, Perret 2003, 470). Dit alles laat vele verschillende sporen na en maakt het gebied van de smid moeilijker vatbaar in de archeologie.

## 1. Onderzoeksmethode en analysetechnieken

Macroscopisch onderzoek en een chemische bulkanalyse zijn de speerpunten van dit onderzoek. Met deze twee analysemethoden werd er voor de drie sites systematisch onderzoek gedaan op verschillende kenmerkende slakken.

Uit de hoeveelheid materiaal werd per site de meest karakteristieke ijzerslakken verzameld en gefotografeerd. De selectie gebeurde op basis van morfologie, aanwezigheid van inclusies, magnetische eigenschappen, kleur en gewicht. Indien interessant werden enkele monsters doorgeslepen om de inwendig structuur te onderzoeken. Het doorslijpen gebeurde op de maximale lengte van de slak.

Na selectie werd er per site, op basis van literatuur en omgang met het verschillende materiaal, eerste een onderscheid gemaakt tussen reductieslak en post-reductieslak. Een tweede stap bestond eruit beide groepen meer specifiek onder te verdelen naar de opdeling zoals uiteengezet in *Deel I: 5.3 IJzer en slak*.

De chemische analyse zal in deze verhandeling in eerste plaats worden gebruikt ter illustratie van de macroscopische verdeling. Een vergelijking van de resultaten van beide methoden is interessant om te bestuderen of louter macroscopisch onderzoek voldoende is om te discrimineren. Met andere woorden, duiden opgemerkte chemische verschillen ook op verschillen tussen de veronderstelde groeperingen?

Uit de specifieke groepen werd een totaal van tien stalen geselecteerd voor een chemische bulkanalyse. Deze analyse werd uitgevoerd met behulp van X-stralen fluorescentie (XRF) (Figuur 10). Voor elke meting werd een spanning van 50kV gebruikt en een stroom van 40 $\mu$ A (deadtime ca. 30%). Het focuspunt/*spotsize* van de X-stralenbundel bedroeg 300 $\mu$ m en de analysetijd steeds 1000 sec in vacuüm.

Inherent aan de analysemethode zullen enkel elementen vanaf natrium (Na) worden gedetecteerd. In praktijk blijkt ook magnesium (Mg) nog moeilijk te bevatten. De berekening naar oxides werd gedaan via de beschikbare software (zie bijlage 2). Al het ijzer werd berekend naar FeO, uitgezonderd wanneer het een erts betrof. FeO komt zelden voor in de natuur en het ijzer werd aldus omgerekend naar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



Vanwege de aanwezige ruis inherent aan de analysemethode konden enkele elementen moeilijk worden onderscheiden. In geval van twijfel werd het element niet ingerekend.

De heterogeniteit van verschillende ijzerslakken, met name smeedslakken, is een problematisch gegeven. Er werd niet voor geopteerd om de monsters in kwestie te homogeniseren (d.m.v. verpoedering), dit om de mogelijkheden van een meer extensieve monsterpreparatie te onderzoeken. Verwacht wordt dan ook dat resultaten van deze stalen mogelijk geen accurate weerslag zullen zijn van de volledige chemische samenstelling. Een gemiddelde waarde van twee geanalyseerde punten op hetzelfde monster tracht dit ontbreken deels op te heffen. De chemische analyse kan niettegenstaande interessante gegevens bieden met betrekking tot de aanwezigheid van bepaalde kenmerkende elementen of sporelementen. Voor slakken met een homogene structuur, voornamelijk reductieslakken, wordt verwacht dat de analyse in onverpoederde vorm minder problematisch zal zijn.

De monsters werden in die mate behandeld dat de oppervlakkige corrosielaag en de resterende verontreinigingen werden verwijderd. Vervolgens werden twee puntmetingen per monster genomen.



Figuur 10: De EDAX Eagle III microprobe, UGent Vakgroep Analytische Chemie XML.

## 2. Chemische samenstelling van de ijzerslak

Het hoofdbestanddeel van de slak bestaat uit fayaliet ( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Daarnaast kan de slak nog vele andere elementen bevatten, elk met een eigen oorsprong. Deze elementen kunnen helpen in de discriminatie van reductie- en smeedslakken.

Bijlage 3 toont de chemische elementen aangetroffen in de slakken en geeft een bondige verklaring voor hun aanwezigheid.

### 2.1. Reductieslak

Tijdens reductie blijft de niet-vluchtige chemische samenstelling van het erts constant. Ze herverdeelt zich echter wel: enerzijds in een gereduceerde metallische fase en anderzijds in een geoxideerde slak. We kunnen verwachten dat de chemische verhouding tussen het erts en de slak constant is (Serneels 1993, 76).

Tijdens het reductieproces zal een deel van het ijzeroxide in het erts reduceren naar metallisch ijzer. Andere elementen die gemakkelijk reduceerbaar zijn, zoals Cu, Ni en Co, zullen meer binden met de metallische fase (en dus niet, of in mindere mate in de slak voorkomen). Anderzijds blijven elementen die moeilijk te reduceren zijn (Si, Al, Ti, Mg, Ca, K, Zr, Y, Rb, Sr en Ba) in geoxideerde fase vooral terug te vinden in de slak. Mn-concentraties zijn zeer veranderlijk in het erts aanwezig en zijn ook voornamelijk aanwezig in de slak.

Elementen als Zn, Na en Pb zijn niet meer aanwezig aangezien deze snel overgaan naar gastoestand. Sn, Ag en Sb komen niet voor in de ertsen en dus ook niet in de slak.

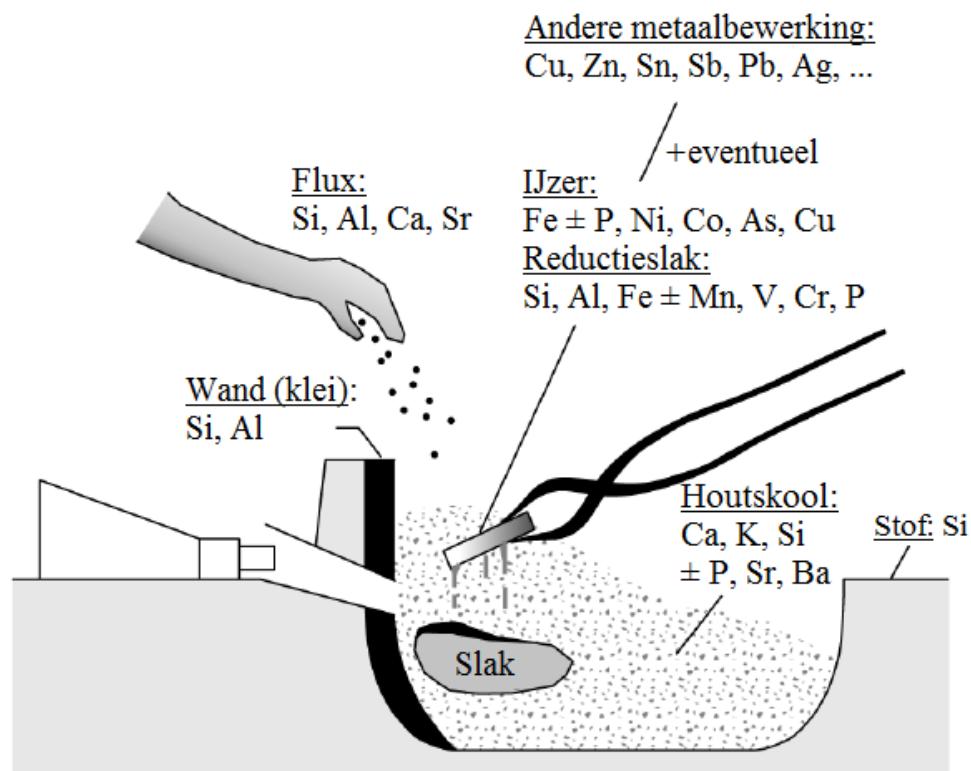
P, Cr en V daarentegen zijn door de reducerende eigenschappen gelijkaardig aan ijzer, soms gedeeltelijk gereduceerd, soms ook niet en zullen zich voornamelijk in de slak bevinden. De laatste twee elementen kunnen ook enkel tijdens het reductieproces in de slak terecht komen, waardoor ze een goede indicator kunnen zijn voor reductieslakken (Serneels 1993, 76-77). Voor fosfor is geldig dat 25 tot 50% in het ijzer kan gevat zijn, met positieve eigenschappen voor de hardheid (Pleiner 2000, 265).

Naast de gangelementen (vnl. Si) zal ook de wand van de oven die gedeeltelijk smelt door de hitte (vnl. Al), en de as van de brandstof (Ca en K, en in kleinere mate Si, Mg, P, Na, ...) een aandeel leveren in de chemische samenstelling van de reductieslak. In dit opzicht moet ook de toevoeging van kalk(steen) vermeld worden, die mogelijk voor een verbetering van het productierendement zorgde (Serneels 1993, 76; zie echter Tylecote (1962, 187) en Pleiner (2000, 136) voor een ander standpunt). Kalk kan, aangetroffen in kleine hoeveelheden,

eveneens afkomstig zijn van een kalkhoudende klei waaruit de oven werd opgetrokken (Joosten 2004, 27).

## 2.2.Smeedslak

Tijdens het smeden wordt de slak beïnvloed door verschillende factoren die de chemische samenstelling van de slak bepalen. Dit wordt duidelijk middels Figuur 11.



Figuur 11: Schematische voorstelling van het smeedproces, met de oorsprong van de voornaamste chemische elementen die in de smeedslak kunnen worden aangetroffen. Naar: Serneels & Perret 2003, 472: figuur 3; Serneels, Feugère 1998, 35: figuur 31.

Eerst en vooral draagt de oxidatie van het ijzer in de smeedhaard bij tot de vorming van de slak. Door de warmte ontstaat een laag van ijzeroxide op het ijzer die afbreekt en in de haard valt. Naast ijzeroxide komt metallisch ijzer ook frequent voor. Door slechte raffinage en consolidatie van de wolf kunnen ijzerfragmenten die slechts door een slakmatrix worden vastgehouden lossmelten (Serneels, Feugère 1998, 33). Magnetische zones zijn dan ook eigen aan smeedslakken (echter niet exclusief ermee verbonden). Het ijzer zelf is ook verantwoordelijk voor sporen van Cu, Ni en Co in de smeedslak. Echter wanneer koper in een beduidende hoeveelheid terug te vinden is in de slak, is de oorzaak ervan hoogstwaarschijnlijk

terug te leiden naar de bewerking van andere metalen in hetzelfde vuur (dit geldt evenzeer voor Sn, Sb, Ag, Au, Pb, ...) (Serneels 1993, 77).

Silica, SiO<sub>2</sub>, komt voornamelijk terecht in de slak als flux, maar ook door inwaaierend stof en in mindere mate via de brandstof.

De (beperkte) minerale samenstelling van de houtskool is sterk variabel (leeftijd, soort boom, welk deel, ...), en bevat naast voornamelijk Ca en K ook kleine hoeveelheden Si, Mg, P, ... (Serneels, Perret 2003, 472). Zoals eerder aangehaald werd naast houtskool ook steenkool in de smeedoven gebruikt. Een 10-tal minerale basiselementen kunnen, naast vele spoorelementen, onderscheiden worden (zie Tabel 1). Deze elementen kunnen eveneens een invloed hebben op de chemische samenstelling van de smeedslak (zie ook Tabel 3 voor de chemische samenstelling van de steenkool).

Tabel 1: Belangrijkste anorganische bestanddelen van steenkoolassen. Uit Speight 2012, 198: tabel 7.4.

Element	%
SiO <sub>2</sub>	40-90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20-60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-25
CaO	1-15
MgO	0.5-4
Na <sub>2</sub> O	0.5-3
K <sub>2</sub> O	0.5-3
SO <sub>3</sub>	0.5-10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0-1
TiO <sub>2</sub>	0-2

Uit de tabel kan worden afgeleid dat voornamelijk zwavel, SO<sub>3</sub>, wanneer in ruime mate aanwezig, het gebruik van steenkool verraadt. Elementen als Ca of Mg zijn niet exclusief daar deze ook in de houtskool zal voorkomen. Aanwezigheid van zwavel in de slak kan ook te verklaren zijn wanneer een ijzersulfide als erts werd gebruikt. Het gehalte zal in dit geval laag zijn. Een verhoogd Ti-gehalte kan eveneens wijzen naar het gebruik van steenkool.

Restanten van reductieslak in het ijzer zorgen voor de aanwezigheid van V, Cr en Mn in de smeedslak. Verhoogde concentraties van vooral V en Cr in de smeedslak kunnen aldus gekoppeld worden aan het raffinageproces (Serneels 1993, 77-78).

### 3. Sites

#### 3.1. Klein Sinaai - Boudelo

##### 3.1.1. Inleiding

Noodopgravingen onder leiding van Alfonds De Belie van het VOBOV, verricht in 1971 tot 1975 en 1981 tot 1986, brachten de restanten van de Boudelo-abdij te Klein-Sinaai (Stekene, Oost-Vlaanderen) en de bijhorende structuren aan het licht. Deze opgravingen bleven naar huidige archeologisch-methodologische standaard vrij beperkt en hoewel getracht werd de vondsten (vnl. het aardewerk) in een breder kader te plaatsen, werd er vooral geconcentreerd op de architectuur van de abdij (De Belie 1997).

Onderzoek van de Universiteit Gent in 2011 en 2012 nabij deze Cisterciënzerabdij leverde verassende resultaten op. Met behulp van elektromagnetische inductie (EMI) werd de bodem ten zuiden van de abdij geanalyseerd, resulterend in een bodemkundige en archeologische kartering van het complexe landschap (De Smedt *et al.* 2011; zie Figuur 12). In tegenstelling tot wat werd aangenomen was de abdij niet begrensd tot de dekzandrug, maar was het land ten zuiden hiervan – een drassig landschap teruggaand op een Laatglaciaal paleomeer – eveneens onder cultuur gebracht. Naast vele grachten die wijzen op een economische exploitatie van het moerassig gebied, werden ook twee verhoogde en omgrachte sites ontdekt met restanten van bakstenen funderingen. Beide sites werden door de vakgroep Archeologie van de UGent onderworpen aan een kleinschalige opgraving voor interpretatie en evaluatie voor het *in situ* behouden van het archeologisch erfgoed (De Reu *et al.* 2013, 1111). Het onderzoek wees uit dat de structuren te dateren zijn in de late 13<sup>e</sup>, vroege 14<sup>e</sup> eeuw. Ze worden doorgaans geïnterpreteerd als aparte erven die in nauwe relatie met de abdij staan<sup>1</sup>. Huidige stand van onderzoek lijkt er tevens op te wijzen dat deze gebouwen slechts een kort bestaan kenden. De oudst gekende kaart van de Boudelo-abdij is de kaart van Wulfsdonck en dateert van 1576 (De Belie 1997, 12). Hierop zijn beide structuren niet meer zichtbaar. Beide sites zijn laatmiddeleeuwse landelijke bewoningsvormen en behoren tot de categorie van “site met walgracht” (SMW) type A1 zoals gedefinieerd door F. Verhaeghe (1981).

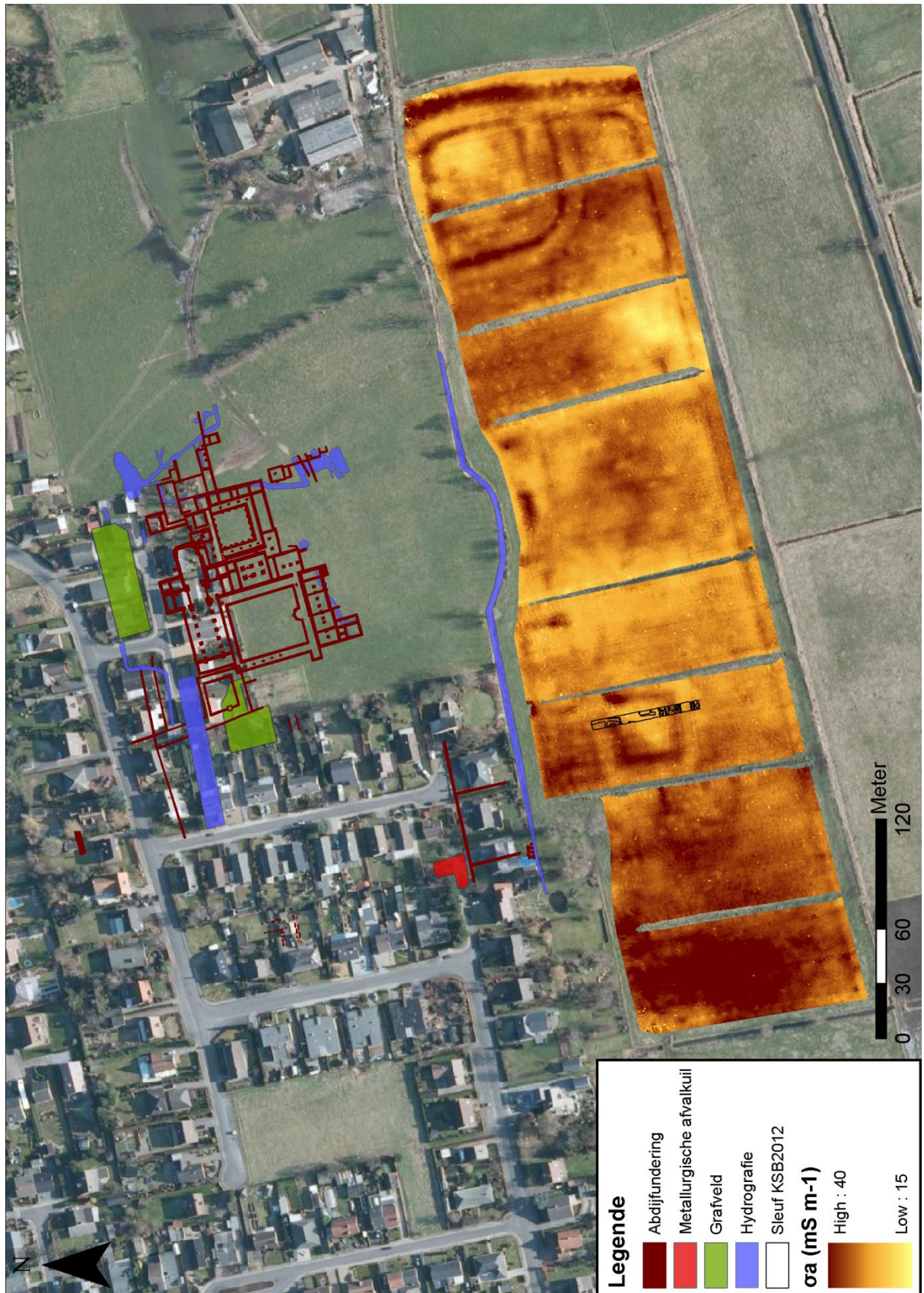
---

<sup>1</sup> persoonlijk commentaar Prof. dr. Wim De Clercq

De abdij zelf, gesticht door een kleine gemeenschap in 1197, groeide snel uit tot een grote economische factor in de streek. Ze was gelegen in een moerasachtig gebied, aan de rand van het Graafschap (Figuur 9), en het landgoed van de abdij breidde - voornamelijk door grafelijke schenkingen - vanaf het eind van de 13<sup>e</sup> eeuw tot de 16<sup>e</sup> eeuw uit tot meer dan 1000 hectare (De Smedt *et al.* 2013, 1-2; De Belie 1997, 4). In de 16<sup>e</sup> eeuw leidden economische, religieuze en uiteindelijk, in 1578, militaire twisten tot het opgeven van de abdij. De monniken verhuisden permanent naar het *refugium* te Gent, en de gebouwen te Boudelo werden verkocht en ontmanteld (De Belie 1997, 3).

De middeleeuwse Cisterciënzerabdij van Boudelo is geen uitzondering op vlak van economische ontginningen. De monniken organiseerden hun buitenbezit via compacte exploitatie-eenheden, *grangia* of uithoven geheten (Blockmans, Hoppenbrouwers 2009, 164), verbouwde er graangewassen, hielden een veestapen, dijkte grote gebieden in die op hun beurt werden geëxploiteerd, bezaten grote bossen waar varkens aten en waar het hout kon worden aangewend als bouwmetaal en brandstof (o.a. houtskool). Verschillende ambachten werden uitgevoerd, enerzijds om het autarkisch bestaan zoveel mogelijk in stand te houden, anderzijds voor de vanzelfsprekende economische voordelen. Een van de deze ambachten was metaalbewerking en ijzerproductie.





Figuur 12: Overzichtskaart van de Boudelo-site en zuidelijke percelen. Het onderzoek uitgevoerd door de UGent is aangeduid als “Sleuf KSB2012”. De afvalkuil beschreven door De Belie (1997) situeerde zich tussen de abdij en de sleuf (rode markering). Naar De Smedt *et al.* 2013, 3 en De Belie 1997. Kaart samengesteld in ENSI ArcMAP 9.3.

### 3.1.2. Materiaal en analyse

#### 3.1.2.1 Abdijsite Boudelo jaren '70 en '80

De Belie (1997) verwijst in zijn monografie één maal naar de mogelijkheid van ijzerproductie en -bewerking in de Boudeloabdij. Hij vermeldt de vondst van een “samengekoekt laagje ijzerslakken [...] dat de vorm had van de bodem van een laagventje, zelf het uitlaattuitje was te zien. De ijzerslakken en moerasijzererts vormden een afdekkingslaag van de vroegste keramiek” (De Belie 1997, 159). Wat De Belie beschrijft is een FCS (*furnace cooled slag*) en een fragment van een tuyère. Er werden echter geen grondplan of profiel ingetekend van dit spoor, noch zijn er, zover bekend, foto's gemaakt van het materiaal. In dezelfde sleuf werden naast slakken en ijzererts ook steenkool en verbrande Doornikse kalksteen gevonden (Stedelijk Museum Sint-Niklaas 1982, 74). Het materiaal werd aangetroffen in een grote afvalput in sleuf 1, gesitueerd op één van de eindpunten van de huidige Kloosterstraat (zie Figuur 12).

De archeologische vondsten aangetroffen tijdens deze opgraving worden grotendeels in het depot van het Stedelijk Museum Sint-Niklaas (SteM) bewaard. Deze oude collectie werd ingekeken en er is, zoals De Belie opperde, inderdaad materiaal aanwezig die in verband kan worden gebracht met de productie van ijzer. Naast fragmenten van limoniet konden ook meerdere zeer goed gevormde tapslakken worden onderscheiden. Het problematische is dat alle slakken quasi contextloos zijn of dat enkel het jaar van opgraving is vermeld. Los van het ontbreken van chrono-stratigrafische informatie kan dus bijna met zekerheid aangenomen worden dat ijzerproductie heeft plaatsgevonden op de abdijsite te Klein-Sinaai. De karakteristieke tapslakken, de aanwezigheid van limoniet en de mogelijkheid om deze in nabijgelegen moerasdalen te ontginnen, en de melding van De Belie (1997, 159) bekrachtigen deze aanname.

Naast de productieslakken werden nog tientallen *non-diagnostic slags* aangetroffen in het depot. Vanwege de lage chrono-stratigrafische waarde werden deze slakken niet in de analyse opgenomen.

Steenkool werd ook veelvuldig aangetroffen in het depot, in contexten verspreid over de hele site. Er moet op gewezen worden dat deze brandstof niet gebruikt werd bij de productie van ijzer. De monniken van de Boudelo-abdij moesten dus ook houtskool hebben gebruikt. Voor de post-reductiefase kan steenkool wel gebruikt worden. Mogelijk werd de brandstof daarnaast nog gestookt als warmtebron.



### 3.1.2.2 Klein-Sinaai Boudelo 2012 (KSB 2012)

Alle bestudeerde slakken zijn afkomstig uit sporen 4, 5, 12, 25, 26 en 27. Het betreft met name materiaal uit de verschillende opvullingslagen van de noordelijke gracht die de site omsloot. Spoor 26 betreft de graduele opvulling van de gracht die in gebruik is (Figuur 13 (1)). Spoor 25 ontstaat wanneer de gracht snel wordt opgevuld met nederzettingsafval (baksteen, keramiek, metaalslakken, ...). Spoor 4 en 5 zijn gerelateerd aan het uitgraven van de gracht. In totaal werd er 6223g slakmateriaal verzameld op de site.



Figuur 13: Coupefoto vanuit het noorden van sporen 26 (1) en 25 (2) met aanduidingen van de verschillende lagen.

### Macroscopische studie

De metaalslakken werden opgedeeld in de categorieën zoals uiteengezet in *Deel I: 5. Archeologische zichtbaarheid ijzerproductie en -bewerking*. Op de site werden geen reductieslakken aangetroffen.

Niet elke ijzerslak is even interessant voor macroscopische studie, laat staan chemische bulkanalyse. Een deel van de slakken uit de gracht zijn poreuze agglomeraten van fayaliet, glas en brandstof. Zij vallen onder de categorie van *non-diagnostic slag*.

Tabel 2 Totale gewichten (g) van de metaalslakken uit de zes sporen.

	Spoor 4 Gewicht (g)	Spoor 5 Gewicht (g)	Spoor 12 Gewicht (g)	Spoor 25 Gewicht (g)	Spoor 26 Gewicht (g)	Spoor 27/5 Gewicht (g)	Totaal	%
<b>PCB</b>	1027	-	-	1420	932	-	3379	54,3
<b>Ijzerwolf</b>	909	-	-	-	-	-	909	14,6
<b>Non-diagn.</b>	-	28	57	1029	450	167	1731	27,8
<b>Lining</b>	-	-	-	154	-	-	154	2,5
<b>Totaal</b>	1936	28	57	2653	1382	167	6223	

- Smeedslakken

In totaal werden 3379g planoconvexe smeedslakken gevonden, goed voor 54,3% van het totale gewicht. De meeste van de slakken werd aangetroffen in sporen 25 en 26, d.i. de stortlaag waarmee de gracht werd opgevuld.



Figuur 14: Doorsnede van een planoconvexe smeedslak uit spoor 25 (ksb25\_pcb\_1) (links). Bovenzijde van een PCB uit spoor 4 (ksb4\_sas\_2) (rechts).

Figuur 14 links toont de doorsnede van een PCB. De geschatte porositeit van de slak bedraagt ca. 25%, waardoor ze een betrekkelijk lage densiteit hebben. De smeedslakken zijn zeer heterogeen in vergelijking met deze aangetroffen op de twee andere besproken sites (zie *infra*).

Ze bestaan uit een agglomeraat van ijzeroxide, fayaliet, kleine fragmenten metallisch ijzer, steenkoolfragmenten en silica. De bovenzijde is afgerond en bedekt met een oranje oxidelaag; de onderzijde toont afdrucken van de smeedhaardbodem en de brandstof. De metaalgrijze vlakken die in de doorsnede zichtbaar zijn, zijn licht magnetisch.

- Ijzerwolf

Er werd één vermoedelijke ijzerwolf (*bloom*) aangetroffen in spoor 4 (Figuur 15). De wolf weegt 909g en is zwaar in vergelijking met het andere geanalyseerde materiaal.

Zoals eerder vermeld is het onderscheid tussen een planoconvexe smeedslak en een ijzerwolf niet evident te maken. De ijzerwolf uit spoor 4 heeft de typische vorm van een PCB, maar bevat tevens een grote hoeveelheid metallisch ijzer onderaan waardoor deze zone zeer magnetisch is.

De identificatie als een ijzerwolf is gebaseerd op de talrijke aanwezigheid van gecompacteerd metallisch ijzer. De wolf zal in dit geval dus al de eerste stadia van raffinage voorbij zijn.

De mogelijkheid dat het hier gaat om een PCB blijft echter open. Immers, wanneer ijzer wordt bewerkt komt steeds een geringe hoeveelheid van het metallisch ijzer in de slak terecht. Hoeveelheden zoals opgemerkt in het staal “ksb4\_pcb-wolf” zijn abnormaal, maar niettemin mogelijk wanneer een aanzienlijk fragment ijzer verbrand tijdens het smeden en in de slak terecht komt. De planoconvexe vorm pleit hier in het voordeel van een identificatie als PCB.



Figuur 15: Afbeelding van de ijzerwolf uit spoor 4 (ksb4\_pcb-wolf). De metaalgrijze zone bestaat uit metallisch ijzer.

De bovenzijde is vrij vlak en heeft een donkerbruin-oranje oxidekleur. De onderzijde toont afdrucken van de smeedhaardbodem en heeft dezelfde kleurschakering als de bovenzijde.

De doorsnede toont ook een bepaalde gelaagdheid. Verschillende “banden” zijn waar te nemen in de structuur van de metaalgrijze zone, alsook banden van verhoogde porositeit (vnl. bovenaan en onderaan de slak). In tegenstelling tot de meeste PCB slakken, werden er geen fragmenten van steenkool aangetroffen die samengesinterd waren met de slak.

Een witte bedekking aanwezig op enkele zones kan op zwavel of (minder waarschijnlijk) op arseen duiden.

- Non-diagnostic slag

Van deze slakken werden respectievelijk 28g in spoor 5, 57g in spoor 12, 1029g in spoor 25, 450 in spoor 26 en 167g in spoor 27/5 gevonden. In totaal is deze categorie goed voor 1731g of 27,8% van het totale gewicht.



Figuur 16: Voorbeeld van een *non-diagnostic slag* afkomstig uit spoor 26 (ksb26\_nd\_1). Bemerkt de fragmenten steenkool vervat in een matrix van ijzeroxide en fayaliet.

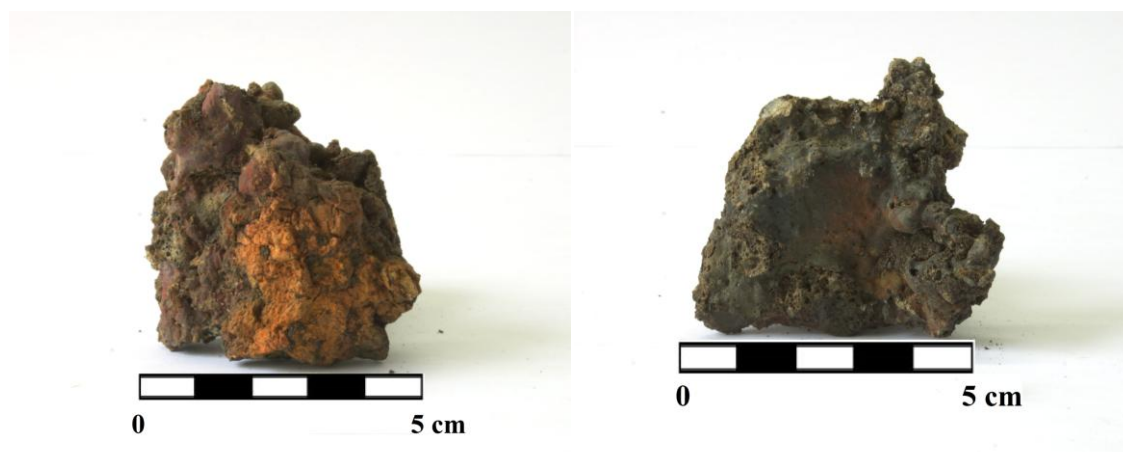
De term *non-diagnostic* is enigszins misleidend vermits de slakken wel onrechtstreeks kunnen toegeschreven worden aan een fase in de *chaîne opératoire*. Door de aanwezigheid van steenkool gevat in de vele kleine slakfragmenten kunnen ze geassocieerd worden met het smeden of de raffinage. Immers, tijdens het reductieproces kon enkel houtskool worden gebruikt, terwijl steenkool enkel voor de post-reductiefase werd aangewend.

De categorie bevat agglomeraten van brandstof, ovenmateriaal, fayaliet, glas en wandfragmenten. Grillige vormen en een donkergrijze kleur zoals voorgesteld op Figuur 16 zijn karakteristiek voor deze slakken.

#### - *Furnace Lining*

Uit spoor 25 kwamen twee fragmenten aardewerk voor met een totaalgewicht van 154g. Hoewel er geen verglaasde zijde aanwezig is, maakten ze vermoedelijk deel uit van de structuur van de smeedoven. Het betreft materiaal uit een grijze zacht gebakken klei, verschraald met ruw zand en organisch materiaal.

Deze categorie overlapt deels met de categorie van de *non-diagnostic slag* aangezien de laatste ook enkele fragmenten glazige mengsels van brandstof en ovenmateriaal bevat. In spoor 25 werd een enkele verglaasde wandfragment aangetroffen waaraan een fragment van roodgebakken aardewerk gehecht is (Figuur 17). De verglaasde kant heeft een donkergrijze kleur met donkerrode zones en bestaat uit samengesmolten ijzeroxide, fayaliet en brandstofas.



Figuur 17: Afbeelding van de voor- (rechts) en achterzijde (links) van een verglaasd fragment *lining* uit spoor 25 (ksb25\_nd\_2).

### Chemische analyse

Er moet rekening worden gehouden dat de chemische analyse werd uitgevoerd op het (sterk geoxideerde) oppervlakte van een heterogeen monster, en dat de waarden geen duidelijke indicator zijn voor de chemische samenstelling van de volledige slak. Niettemin kunnen enkele zaken en verschillen tussen de geanalyseerde slakken opgemerkt worden.

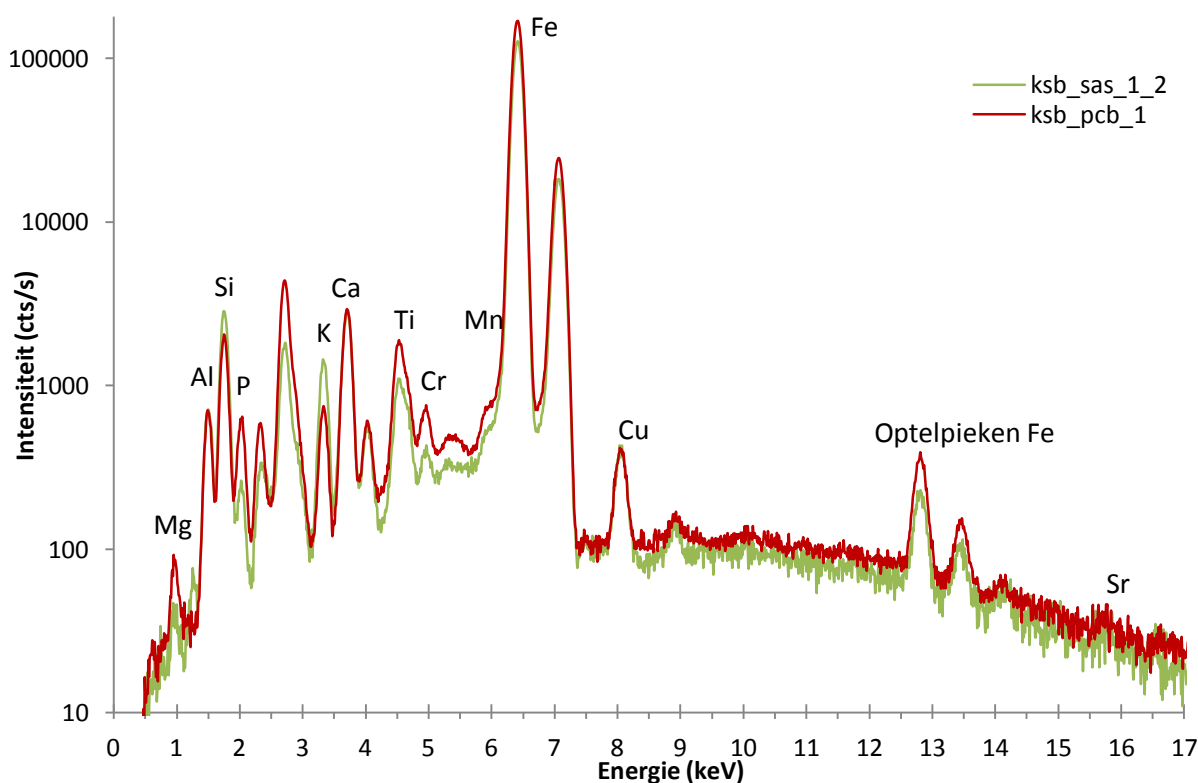
Tabel 3: Resultaten van de chemische analyse. Het betreffen de gemiddelde waarden van twee verschillende meetpunten op hetzelfde monster (uitgezonderd van monster ksb4\_sas\_1\_2). Zie bijlage 4 voor de volledige resultaten

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ksb25_sgd	n.d.	11,37	19,01	0,46	2,77	2,39	1,49	0,750	0,071
ksb25_nd_1	2,495	20,77	42,55	0,36	n.d.	8,35	1,91	1,485	0,106
ksb25_pcb_1	n.d.	4,07	6,63	1,64	n.d.	0,61	2,06	0,858	0,073
ksb4_sas_1_2	1,531	5,17	11,83	0,69	n.d.	1,59	2,70	0,596	n.d.
ksb26_sk_1	n.d.	17,72	48,99	1,31	11,87	7,78	2,91	2,212	n.d.
ksb_x_erts_1	n.d.	2,09	11,18	7,73	4,47	0,60	5,12	0,224	n.d.
	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ksb25_sgd	0,123	63,21	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ksb25_nd_1	0,167	23,00	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,174	0,203
ksb25_pcb_1	0,207	83,42	0	0,372	n.d.	n.d.	n.d.	0,100	n.d.
ksb4_sas_1_2	0,186	75,02	0	0,479	n.d.	n.d.	n.d.	0,200	n.d.
ksb26_sk_1	n.d.	6,74	0	0,064	0,192	n.d.	0,103	0,108	n.d.
ksb_x_erts_1	4,323	0	65,82	n.d.	n.d.	0,257	n.d.	0,184	0,671

- Smeedslakken

Er werden twee smeedslakken (ksb25\_pcb\_1 en ksb4\_sas\_1\_2) aan chemische analyse onderworpen (Figuur 18). De smeedslakken bevatten een grote metallische component (FeO tussen 75 – 83%), iets wat voornamelijk karakteristiek is voor slakken van het type SFR (*scorie ferreuse rouillée*) (Anderson *et al.* 2003, 143). De stalen ksb4\_sas\_1\_1 en ksb4\_sas\_1\_2 gaven beide een zeer verschillende samenstelling. Deze variatie is te wijten aan het heterogene karakter van het monster. Er werd geopteerd om ksb4\_sas\_1\_1 uit de analyse te laten aangezien de meting werd uitgevoerd op een zone met veel verontreiniging.

Verhoogde waarden van koper, een metaal die niet in het erts en slechts in kleine mate in de brandstof werd geïdentificeerd (zie *infra*), zijn niet te interpreteren als sporelement.



Figuur 18: De twee XRF-spectra van de geanalyseerde smeedslakken vergeleken. De elementen Mg, P, K, en Ti variëren licht, maar de hoofdelementen blijven vergelijkbaar.

- Non-diagnostic slag

Twee slakken binnen deze categorie zijn geanalyseerd. Het betreft de monsters ksb25\_nd\_1 en ksb25\_sgd. Deze laatste slak werd eerder als van het type SGD (*scorie grise dense*) aangeduid (Figuur 19), maar chemische analyse wees uit dat vanwege de verhoogde  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -waarde het vermoedelijk gaat om een fusie tussen brandstof, het ijzer en de ovenwand. De

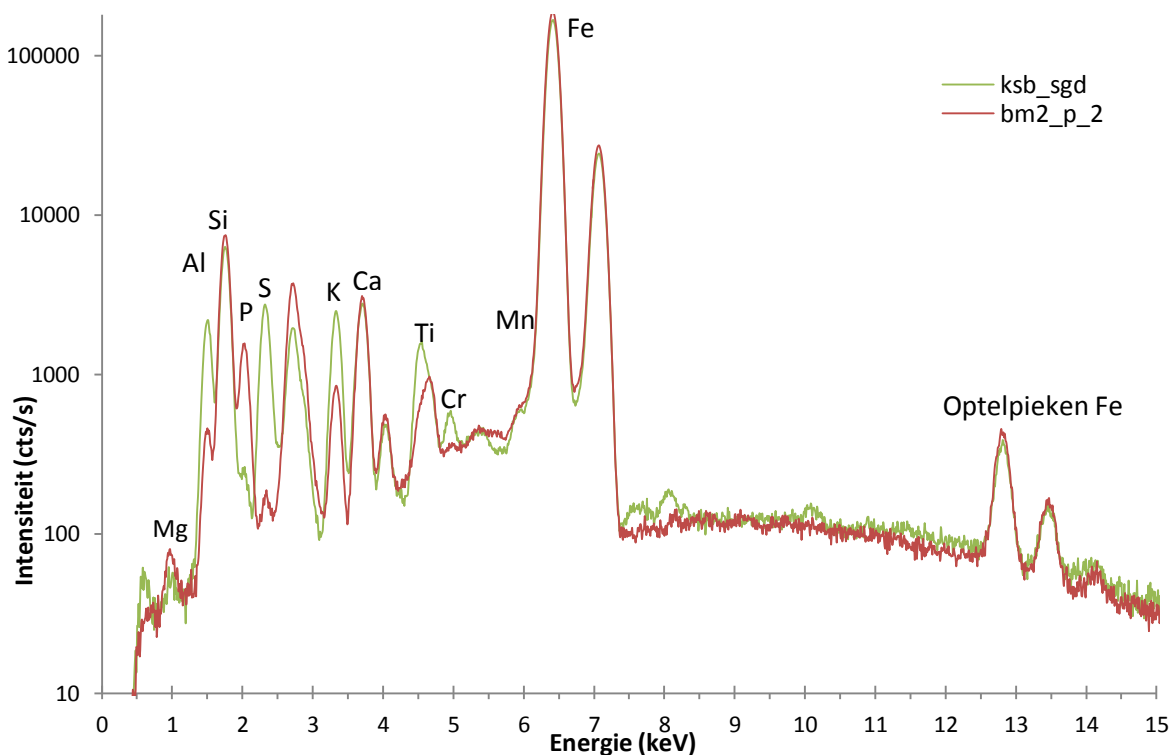


slak vertoont niettemin gelijkenissen met een reductieslak (homogeniteit, relatief zwaar), maar de verhoogde  $K_2O$  en  $Al_2O_3$ -waarden en vooral de aanwezigheid van  $SO_3$  duiden op een affiniteit met de post-reductiefase. Ter illustratie worden de gemeten intensiteiten vergeleken met een productieslak uit de site Gent – Nieuwe Beestenmarkt (Figuur 20).



Figuur 19: Monsternr. ksb25\_sgd. De verhoogde aluminiumwaarde kan wijzen op een fusie tussen brandstof, ijzer en ovenwand.

Het monster ksb25\_nd\_1 is in dat opzicht veel meer onbetwistbaar. Met  $Al_2O_3$ -waarde van 20%, een  $SiO_2$ -waarde van 42% en een  $K_2O$ -waarde van meer dan 8% is de identificatie als fusie van respectievelijk de ovenwand ( $Al_2O_3$  en  $SiO_2$ ) en brandstof (een hoge  $K_2O$ -waarde) duidelijk. De FeO-waarde (23%) dient te worden beschouwd als contaminatie.



Figuur 20: Twee XRF-spectra van de *non-diagnostic slag* uit Klein Sinaai – Boudelo (ksb\_sgd (groen)) en een *tap slag* uit Gent – Nieuwe Beestenmarkt (bm2\_p\_2 (rood)). De aanwezigheid van  $SO_3$  en de

verhoogde  $\text{SiO}_2$  en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -waarden in het monster ksb\_sgd duiden op een schakel met de post-reductiefase.

- Erts

Het geanalyseerde erts (ksb\_x\_erts\_1) is afkomstig uit het depot van het SteM, en werd vermoedelijk opgegraven op abdijsite onder het onderzoek van A. De Belie. De herkomst van dit erts is moeilijk te achterhalen, maar A. Stroobants (1978, 87) vermeld in zijn doctoraatsproefschrift de aanwezigheid van “een massieve oersteenbank van 1,5 tot 2m dik” dat zich bevond boven een kleilaag in een kleigroeve te Stekene. De locatie van deze groeve is niet gekend, maar mogelijk is de herkomst van het erts naar deze terug te leiden.

Het geanalyseerde erts bevat een  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -gehalte van 65%, waardoor het geschikt en relatief rendabel was voor de productie van ijzer. Het aandeel in fosfor (bijna 8%) ligt vrij hoog, wat een positieve bijdrage gaf aan de sterkte en corrosiebestendigheid van het ijzer. De aanwezigheid van dit element, alsook de mangaan ( $\text{MnO}$  ca. 4% in het erts) in de geanalyseerde slakken is rechtstreeks terug te leiden tot het erts.

Het erts bevat ook ca. 5%  $\text{SO}_3$ , een element met negatieve eigenschappen t.o.v. het ijzer. Het aandeel kon afnemen door een voorbehandeling van roosteren (zie *Deel I: 3.1 Voorbehandeling*).

Als laatste is het nevenelement  $\text{As}_2\text{O}_3$  in het erts een opvallende verschijning. Het werd echter niet gedetecteerd in de geanalyseerde slakken.

- Steenkool

De steenkool die werd onderzocht is afkomstig uit spoor 26. Het monster werd aan een chemische analyse onderworpen om het effect van de brandstof op de chemische samenstelling van het slakmateriaal te bestuderen.

Er moet in acht worden genomen dat de chemische samenstelling van steenkool zal verschillen naargelang de plaats (en diepte) van ontginning. De waarden hieronder voorgesteld zijn dus enkel van toepassing op deze casus, en niet transposeerbaar naar andere casussen.

De meest interessante elementen zijn in dit geval de zwavel (ca. 12%), kalium (7,8%), titaan (2,2%), en sporen van koper (0,06%) en zink (0,19%).

De grootste invloed van de steenkool op de chemische samenstelling moeten zwavel en kalium zijn. Slechts in één enkel monster werden duidelijke sporen van zwavel waargenomen (ksb25\_sgd). De visualisatie en identificatie van zwavel werd echter bemoeilijkt door de



aanwezigheid van Rh-L lijnen met de zelfde energie. Enkel de monsters met een duidelijk verhoogde zwavelwaarde konden worden geïdentificeerd, lagere intensiteit werden gemaskeerd.

Kalium is eveneens een hoofdelement. Ze komt echter ook voor in houtskool en is daarom geen indicatie voor het gebruik van de steenkool.

Vermits  $\text{TiO}_2$  ook vertegenwoordigd is in de erts, valt het moeilijk uit te maken door welke invloed dit element in de slak aanwezig is.

De aanwezigheid van ZnO kan als sporelement een indicator zijn voor steenkool, maar omdat de XRF vnl. de hoofdelementen en niet de sporelementen vaststelt, bleek dit element niet traceerbaar met de huidige detectielimieten.

### 3.1.3. Interpretatie

De analyse van het metallurgisch materiaal op de site Klein Sinaai – Boudelo laat duidelijk zien dat het smeden de primaire activiteit moet zijn geweest.

Smederijen zijn in het archeologische record te herkennen aan smeedslakken, halffabricaten, smidsgereedschap, hamerslag, haarden en/of aslagen (Astill 1993, 275). Dat enkel de eerstgenoemde categorie aanwezig is op de site mag niet verwonderen, daar recyclage en hergebruik van ijzeren objecten zeer vaak voorkwam. Het ontbreken van het toenmalig loopvlak weerhoudt ook de conservatie van haarden, aslagen en hamerslag. Deze laatst genoemde categorie is bovendien vaak sterk gefragmenteerd waardoor ze quasi onzichtbaar blijft voor de onderzoeker.

De heterogeniteit van de smeedslakken kan verklaard worden door het toepassen van verschillende bewerkingen (vuurlassen, vormgeving, fijnsmeden, ...) in een enkele smeedactiviteit. Smeedslakken met een homogene, ongelaagde opbouw – een teken van het continu uitvoeren van dezelfde bewerkingen – werden niet onderscheiden. Hieruit kan afgeleid worden dat raffinagesmeden van eventueel lokaal vervaardigd ijzer niet de prioriteit van deze smederij zal zijn geweest.

De aanwezigheid van CuO in de geanalyseerde slakken laat ook zien dat ijzer niet het enige metaal was die werd bewerkt op de site. Het inleggen van gebruiksvoorwerpen met een koperlegering, herstellingen of het gebruik van het zachtere metaal als rivettering zijn voorbeelden van hoe dit metaal in de smeedslakken terecht kon komen.

Het voorkomen van de elementen P, Ti en Mn in zowel de smeedslakken als de erts kan duiden op het gebruik van dit type steen als ijzererts. Het is echter te vergaand om de relatie tussen een smeedslak en het erts te zoeken, aangezien zelfs de relatie tussen een erts en een reductieslak in elementengehaltes zelden eenduidig is. Immers, de elementen worden ongelijk verdeeld tijdens het reductieproces.

Naar het aantal smeedslakken te oordelen werd de activiteit intensief beoefend. Naar alle waarschijnlijkheid verzorgde dit atelier het ijzer- en metaalwerk van de abdij.

De afvalkuil aangetroffen door A. De Belie tijdens de opgravingen in de jaren '70 en '80 toont duidelijke sporen van ijzerproductie. Hoewel het moeilijk is een beeld te schetsen van de omvang van het materiaal dat werd aangetroffen op de abdijsite, is het zeer waarschijnlijk dat ijzerproductie nooit een primaire activiteit is geweest en dat het de lokale noden niet oversteeg.

Als we beide sites als contemporain mogen beschouwen, vond de verwerking van dit ijzer (en waarschijnlijk ook het geïmporteerde ijzer) naar alle waarschijnlijkheid plaats op de site met walgracht gelegen ten zuiden van het abdijdomein. Waarom de tweedeling tussen productie en bewerking – of site met walgracht en abdijdomein – dan zou bestaan is niet duidelijk. De praktische redenen van geluid- en rookoverlast die een smederij teweeg brengt gelden evenzeer voor de productie van het ijzer, en zijn dus amper doorslaggevend.

De meest plausibele stelling is dat beide sites niet gelijktijdig actief waren. Immers, met uitzondering van de twijfelachtige ijzerwolf werd geen materiaal aangetroffen die geassocieerd is met het reductieproces.

Grondige materiaalverwerking en archeometallurgische analyse van het materiaal opgegraven door De Belie kan een licht werpen op deze verschillende vragen.

## 3.2. Gent - Nieuwe Beestenmarkt

### 3.2.1. Inleiding

De site is gelegen in de huidige Sint-Machariuswijk, het gebied waar het voormalige Sint-Baafsdorp en de Sint-Baafsabdij gevestigd waren (zie Figuur 21).

Het areaal kent een vrij turbulente geschiedenis en dit is vooral te wijten aan de bouw van een dwangburcht, het zgn. Spanjaardenkasteel, in 1540 onder Keizer Karel V (1515 – 1555).



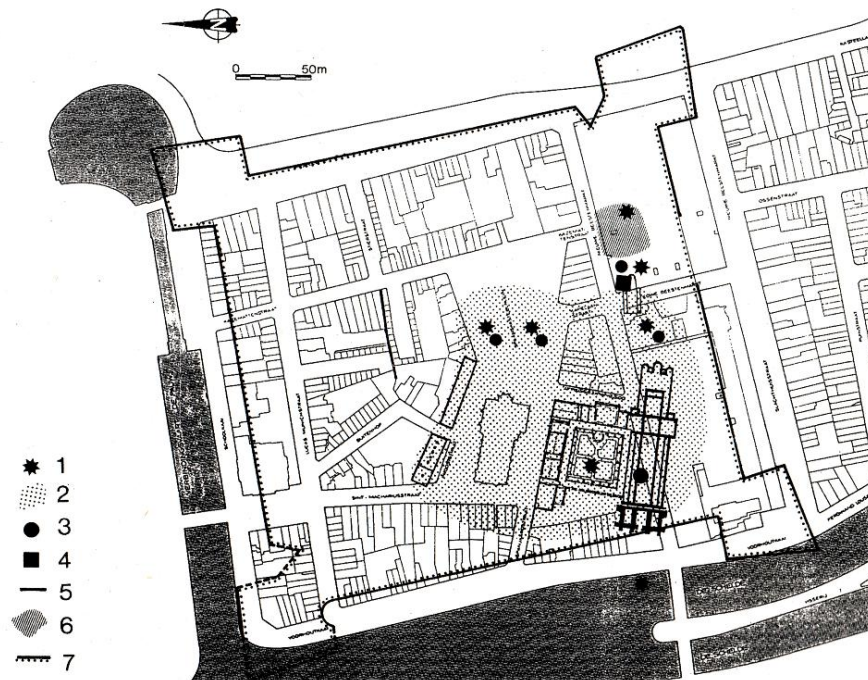
Figuur 21: Detail van de Sint-Baafsabdij en het gelijknamige dorp, net voor de bouw van de dwangburcht in 1540. Zicht vanuit het noordoosten. Uit het Panoramisch Gezicht op Gent, 1534. ©STAM Gent

Er was al vroeg archeologische belangstelling naar dit gebied bij de samenvloeiing van de Leie en de Schelde, hoewel deze in initiële fasen vooral uitging naar de Sint-Baafsabdij die voor het midden van de 16<sup>e</sup> eeuw vernield werd (Laleman 1996, 292-294).

In 1978 werden, vnl. door de stadsarcheologische dienst, voor het eerst systematische opgravingen verricht op dit gebied. Het werd duidelijk dat vooral de diep ingegraven structuren bewaard bleven, het grootste deel van de bewoningsresten werd verwijderd en vergraven bij de aanleg van het Spanjaardenkasteel (Laleman 1996, 300). Niettemin leverden de opgravingen waardevolle informatie over de oude en middeleeuwse geschiedenis van Gent (zie Figuur 22). Naast prehistorische en belangrijke Romeinse sporen, werd ook een niet geringe hoeveelheid Merovingisch en Karolingisch materiaal aangetroffen (echter niet vergelijkbaar met de densiteit van Romeinse sporen). Hoewel er pas vanaf de 11<sup>e</sup> eeuw met zekerheid kan aangetoond worden dat het Sint-Baafsdorp bestond, lijkt een vroegere fase niet uitgesloten (Laleman 1996, 292; 295).

De stichting van de abdij kan door de studie van historische bronnen in het 2<sup>e</sup> kwart van de 7<sup>e</sup> eeuw geplaatst worden. Amandus, of een van zijn volgelingen, richtte het klooster op een plaats *Ganda* op, een strategische plaats waar Schelde en Leie samenvloeien (Laleman 1996, 295). Dat dit klooster in een vacuüm werd gesticht is niet helemaal overtuigend, zeker niet vanwege de aanwezigheid van de contemporaine en dichtbij gelegen Sint-Pietersabdij. Dit kan een extra argument zijn dat er waarschijnlijk al een (Karolingische) nederzettingkern was in de nabijheid van de Sint-Baafsabdij.

In het kader van een bouwproject op de huidige Nieuwe Beestenmarkt werd tussen 1991 en 1992 door de stadsarcheologische dienst van Gent opgegraven. Tijdens deze opgravingen kwamen de sporen van volmiddeleeuwse ijzerbewerking aan het licht in twee (vermoedelijke) afvalkuilen (Figuur 22.6). Dit onderzoek werd echter nooit afgewerkt en/of gepubliceerd wegens het overlijden van de projectleider kort nadat de opgravingen waren afgerond. Deze spijtige gebeurtenis resulteerde in een moeilijke interpretatie van de tijdelijke notities en grondplannen van de opgraving. Daarbovenop is het profiel van de kuilen in kwestie ingestort vooraleer een goeie profieltekening kon worden opgetekend. De chrono-stratigrafische informatie van de site is bijgevolg betrekkelijk laag.



Figuur 22: Overzicht van de archeologische sporen aangetroffen in een gedeelte van de Sint-Machariuswijk. 1. Prehistorische vondsten; 2. Romeinse occupatiesporen; 3. Vroegmiddeleeuwse sporen; 4. Merovingische/Karolingische waterput; 5. Middeleeuwse gebouwssporen; 6. Sporen van middeleeuwse "ijzerbewerking"; 7. Ommuring van het Spanjaardenkasteel. Uit: Laleman 1996, 293: figuur 2.

### 3.2.2. Materiaal en analyse

Het materiaal is afkomstig uit twee naast elkaar gelegen kuilen, nl. kuil 2 met ca. 1,5m op 1m en kuil 3(+3') met ca. 3m op 1,5m, gelegen in werkput 6 (BB6). Het onderscheid tussen spoor 3 en 3' is artificieel en het gaat om hetzelfde spoor.

De exacte locatie van de kuilen is niet meer gekend vermits de plannen nooit uitgewerkt zijn tot een coherent geheel. Beide kuilen lijken o.a. te zijn gebruikt als stort van het metallurgisch afval. In totaal werd 3571g slakmateriaal aangetroffen, quasi gelijk verdeeld over beide kuilen (zie Tabel 4). Met uitzondering van de twee kuilen werden op de site geen andere structuren aangesneden die te maken hebben met metallurgische nijverheid. Althans dit is niet terug te vinden in het dagboek van de opgraving.

De kuilen moeten in de 10<sup>e</sup> tot 12<sup>e</sup> eeuw gedateerd worden door de vondst van gereduceerd aardewerk, Rijnlands geverfd aardewerk en een *imbrex* fragment. Dit Romeinse type van dakbedekking bleef in gebruik tot het midden 12<sup>e</sup> eeuw, waarna ze op het eind van de 12<sup>e</sup> – begin 13<sup>e</sup> eeuw langzaam vervangen werden door een plattere variant met een nokje (De Grootte *et al.* 2009, 148). Dit geeft ons samen met het aardewerk een ruwe datering in de volle middeleeuwen<sup>2</sup>.

#### Macroscopische studie

De metaalslakken werden opgedeeld in de categorieën zoals uiteengezet in *Deel I: 5. Archeologische zichtbaarheid ijzerproductie en -bewerking*. In de twee sporen kwamen uitsluitend, zoals in Tabel 4 te zien is, smeedslakken (PCB), vloeislakken (*Tap slag*) en verglaasde wandfragmenten voor (*furnace lining*).

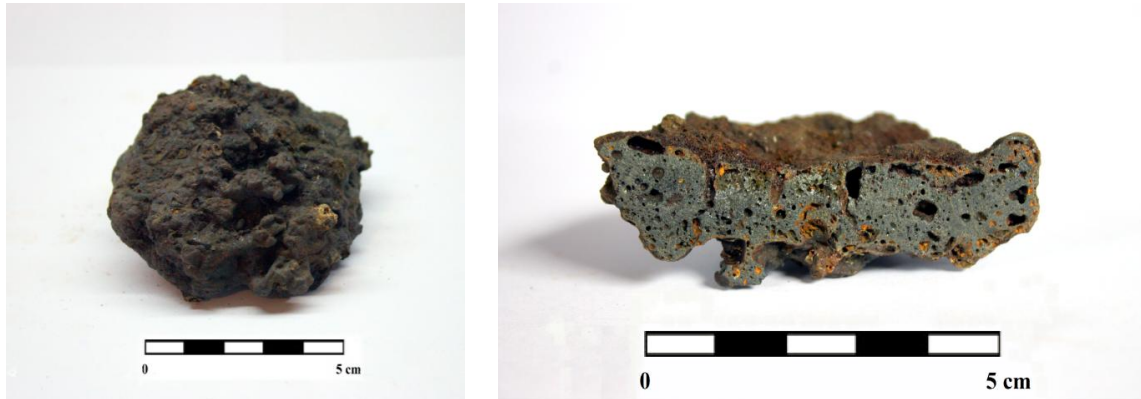
Tabel 4: Gewichten van de metaalslakken uit spoor 2 en 3

	<b>Spoor 2</b> Gewicht (g)	<b>Spoor 3</b> Gewicht (g)	<b>totaal (g)</b>	<b>%</b>
<b>PCB</b>	1046	861	1907	53,4
<b>Tap slag</b>	220	681	901	25,2
<b>Furnace lining</b>	396	367	763	21,4
<b>Totaal (g)</b>	1662	1909	3571	100

<sup>2</sup> persoonlijk commentaar Maarten Berkens, Zwarte Doos Gent

- PCB

De smeedslakken aangetroffen op de site zijn betrekkelijk klein in vergelijking met andere PCB's (zoals te zien is bij de twee andere sites). In totaal werd 1907g van dit materiaal onderscheiden, respectievelijk 1046g in spoor 2, en 861g in spoor 3, goed voor 53,4% van het totale gewicht. Het betreffen komvormige metaalslakken, met een homogene donkergrijze structuur en meten gemiddeld 4 tot 7cm op de lange zijde.



Figuur 23: Afbeelding van een *plano convex smithing hearth bottom* uit spoor 3 (bm3\_pcb\_1). Aan de onderkant (links) zijn negatieve afdrucken de houtskool nog zichtbaar. Rechts is de doorsnede van dezelfde slak afgebeeld waar de lichte plano-convexe vorm zichtbaar wordt.

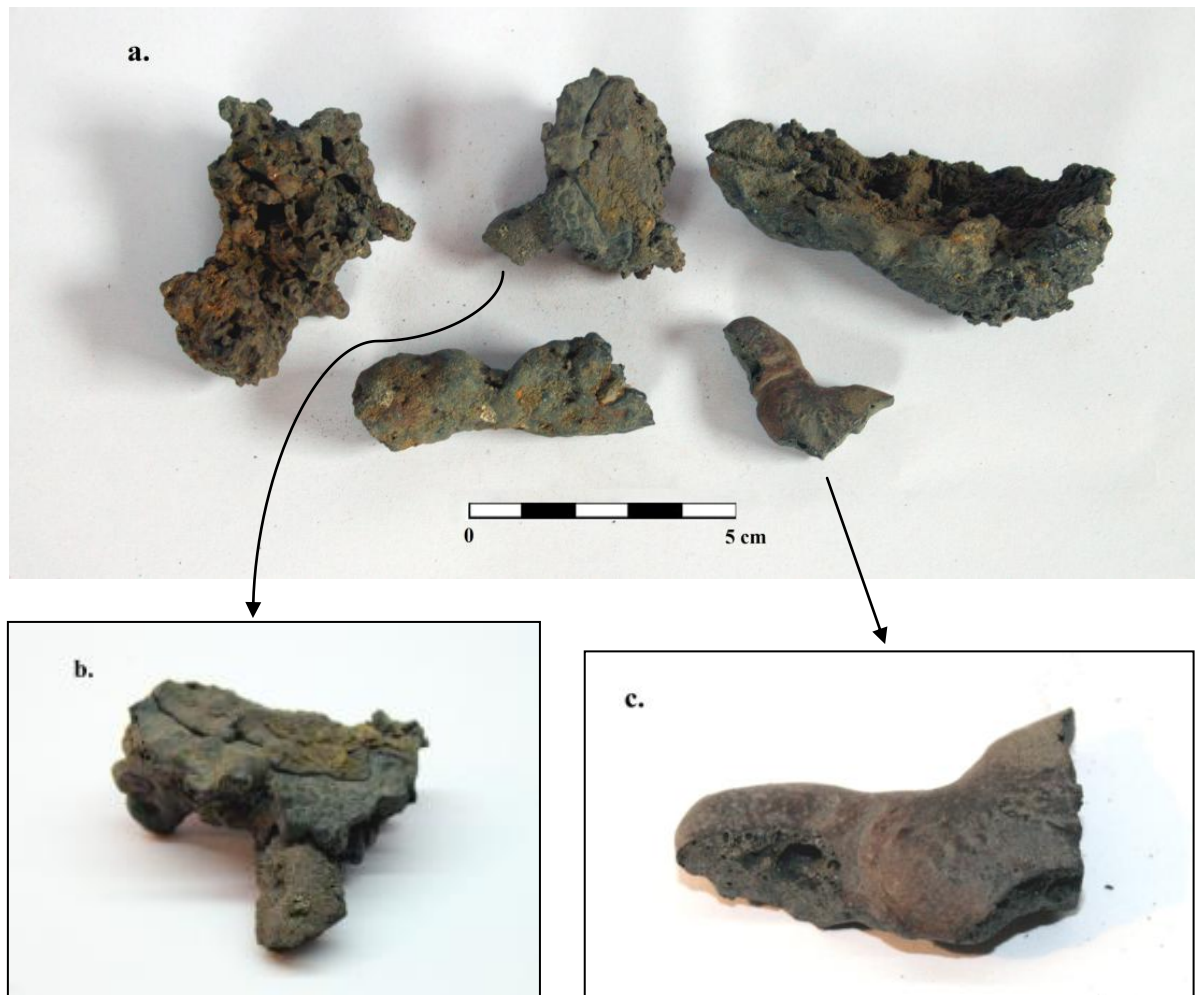
In Figuur 23 is een PCB uit spoor 3 te zien. Ze heeft een uitgesproken boven- en onderzijde. De bovenzijde is relatief vlak en egaal met houtskoolfragmenten in de corrosie vervat. Aan de onderkant is een verticale vloeistruktuur merkbaar, alsook de afdrucken van hout en houtskool. De doorsnede laat een vrij homogene structuur zien zonder enige vorm van gelaagdheid. Zoals zichtbaar is op de foto heeft de slak een geschatte porositeit van 15-20%. De slak is vooral aan de onderzijde licht magnetisch.

Vanwege de geringe diameter en de aanwezigheid van metallisch ijzer is het mogelijk dat deze planoconvexe slakken in feite raffinageslakken zijn. Het is echter onmogelijk deze stelling te staven enkel en alleen door macroscopisch onderzoek. Chemische analyse kan hier mogelijk een bijdrage leveren, maar de determinatie blijft problematisch.

- Tap slag

In totaal werd 901g aftapslakken in de kuilen aangetroffen. Het betreft 220g uit spoor 2 en 681g uit spoor 3. Ze hebben echter een lagere soortelijke massa dan de PCB slakken waardoor ze toch een betrekkelijk aandeel van het volume innemen. De grootte is variabel, gaande van 3 tot 10cm gemeten op de lange zijde.





Figuur 24: a. Samenstelling van verschillende aftapslakken uit kuil 2 (v.l.n.r. bm2\_p\_5, bm2\_p\_2, bm2\_p\_3, bm2\_p\_4, en bm2\_p\_1 uiterst rechts); b. detail van gelaagde structuur (bm2\_p\_3); c. detail van de vloeivorm (bm2\_p\_4).

De slakken hebben een homogene structuur, ook in de doorsnede. Typisch aan de *tap slag* is de vloeistruktuur ontstaan tijdens het uitvloeien en de snelle afkoeling van de slak buiten de oven. Deze vloeivormen zijn goed op te merken in Figuur 24c. Een aantal slakken hebben de vorm van een “goot”, vermoedelijk ontstaan door de slak te geleiden in een aarden stromingsgeultje.

Ondanks hun aaneengesloten voorkomen is de tapslag vrij poreus in de doorsnede (ca. 20-30%), door de snelle afkoeling blijven immers nog vele gassen opgesloten in de slak. De bovenkant is vaak glad, maar kan ook grillige, afgeronde vormen aannemen (Figuur 24a., bm2\_p\_1). De onderkant is een afdruk van de grond waarover de slak vloeide, waardoor inclusies van zand, grind of verbrande klei vaak voorkomen. De slakken zijn zeer licht tot niet magnetisch.

- Furnace Lining

Het betreffen fragmenten met een verglaasde kant en eventueel een kant met rood of grijs gebakken klei (zie Figuur 25). De verglaasde kant is de kant van de warmtebron.



Figuur 25: Voor- (links) en achterzijde van een fragment verglaasde *furnace lining* (bm2\_ws\_1). Deze is voorzien van een ronde opening op de plaats waar de *tuyère* geplaatst zat.

In totaal werd 763g, 396g in spoor 2 en 367g in spoor 3, van deze wandslakken gevonden (Tabel 4). De dikte van de wandfragmenten bedragen gemiddeld 1 cm, maar dit is niet de oorspronkelijke dikte aangezien de klei die minder hard gebakken was reeds is afgebroken. De verglaasde kant heeft een mat grijze tot glazig groen-zwarte kleur. Figuur 25 toont een fragment van de *lining* waar de *tuyère* – het “mondstuk” voor de blaasbalg – gevestigd was. De diameter van de opening bedroeg ca. 1,6 cm.

*Furnace lining* komt zowel bij smeedhaarden als bij reductieovens voor. In één enkel geval was de smeedslak (PCB) samengesmolten met de verglaasde wand, waardoor we kunnen stellen dat het in ieder geval gedeeltelijk om fragmenten van een smeedhaard gaat.

- Erts

In het dagboek aangelegd tijdens de opgravingen is er sprake van ijzeroer. Dit erts werd echter niet aangetroffen tussen de vondsten van kuil 2 en 3 van werkput 6, maar in werkput 8. Het monster werd voornamelijk onderzocht in het licht van een chemische analyse en wordt aldaar meer in detail besproken.



## Chemische analyse

Door middel van XRF werden de hoofd- en spoorelementen van vijf stalen bepaald. Twee PCB, twee tapslakken, één wandslak en een mogelijk erts werden geanalyseerd. Tabel 5 toont de gemiddelde resultaten van elk monster die werd geanalyseerd. Er dient in rekening te worden gehouden dat de foutenmarge op de resultaten op kan lopen tot >10 %. Dit is te wijten door de afwezigheid van homogenisatie. Verwacht wordt dat de *tapslags* (bm2\_p\_\*) wel een goede weergave van de chemische samenstelling geven vanwege hun homogeen karakter.

De hoge ijzerwaarden van de stalen wijst op een duidelijke relatie tussen de slak en het directe reductieproces of raffinage en smeedactiviteiten.

Tabel 5: Resultaten van de chemische analyse. Het betreffen de gemiddelde waarden van twee meetpunten op hetzelfde monster. Legende: p = tapslak; pcb = *plano convex bottom*; ws = *furnace lining*; n.d.: not detected. Zie bijlage 4 voor de volledige resultaten

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
bm2_p_1	n.d.	2,64	25,26	2,19	n.d.	1,49	2,34	0,247	n.d.
bm2_p_2	n.d.	2,05	20,60	4,04	n.d.	0,59	1,92	0,250	0,044
bm3_pcb_1	n.d.	1,66	7,50	2,26	n.d.	0,47	2,73	0,259	0,070
bm3_pcb_2	0,437	1,69	17,78	8,32	n.d.	0,72	4,50	0,160	0,072
bm3_ws_1	n.d.	3,57	24,83	3,72	n.d.	1,83	3,99	0,419	n.d.
bmx_erts-ijzer_1	n.d.	2,46	20,55	0,76	n.d.	0,98	2,23	0,185	n.d.
bmx_erts-ijzer_2	n.d.	0,44	0,63	0,23	n.d.	0,04	0,32	0,199	n.d.
	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	SrO	Totaal			
	%	%	%	%	%	%			
bm2_p_1	0,255	65,58	0	n.d.	n.d.	100,00			
bm2_p_2	0,117	70,42	0	n.d.	n.d.	100,02			
bm3_pcb_1	0,135	85,04	0	0,075	n.d.	100,20			
bm3_pcb_2	0,186	66,40	0	0,090	0,043	100,39			
bm3_ws_1	0,184	61,46	0	n.d.	n.d.	100,00			
bmx_erts-ijzer_1	0,536	0	72,19	n.d.	0,100	100,00			
bmx_erts-ijzer_2	0,145	0	98,02	n.d.	0,262	100,30			

### - PCB

Er werden twee monsters onderworpen aan een XRF om de chemische samenstelling te achterhalen (bm3\_pcb\_1 en bm3\_pcb\_2, zie Tabel 5).

De gemeten FeO, SiO<sub>2</sub> en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-waarden vertonen geen afwijkingen en zijn standaard voor een smeedslak (cfr. de smeedslakken van Klein Sinaai – Boudelo; Bourgeois *et al.*, in druk: Tabel 7).

ZnO werd enkel aangetroffen in beide smeedslakken. Dit element wordt meestal in verband gebracht met de bewerking van een ander metaal in de smeedhaard, maar vermits het hier om kleine percentages gaat (<0,1%), is een andere oorsprong meer waarschijnlijk. Een andere

verklaring is dat het XRF-spectrum verkeerd geïnterpreteerd werd vanwege de ruis op het spectrum, inherent aan de apparatuur.

Chroom is een element die vaak geassocieerd wordt met de reductieslakken. De aanwezigheid hiervan in beide slakken en in een *tap slag* kan wijzen op de identificatie van raffinageslakken. Hierbij moet vermeld worden dat de analytische identificatie van deze slakken nog in de kinderschoenen staat, en dat er geen consensus over de identificatie bestaat (Pleiner 2000, 255).

De waarde van fosfor is sterk verhoogd. Dit is voornamelijk afkomstig van het metaal en restanten van de reductieslak vervat in het metaal. De houtskool kan hierbij ook een bijdrage leveren.

#### - Tap slag

Er werden twee verschillende monsters onderworpen aan een chemische analyse (bm2\_p\_1 en bm2\_p\_2, zie ook Figuur 24a.). De waarden bevestigen de interpretatie als *tap slag*. Opvallend bij deze productieslakken is dat de FeO-waarden vrij hoog liggen, ca. 65% - 70%. Fosfor is aanwezig in de slak en wordt tijdens de reductie gedeeltelijk opgenomen door het ijzer en komt zo gedeeltelijk in de slak terecht. Beide geanalyseerde slakken bevatten een hoog gehalte aan dit element.

De calciumoxide, CaO, bedraagt ca. 2%. Een lage waarde als deze verraadt dat geen kalk als flux werd gebruikt en grotendeels afkomstig is van de brandstofas of ovenwand.

#### - Furnace Lining

Een fragment van de verglaasde wand werd onderworpen aan een chemische analyse (Figuur 26).

De slak heeft licht verhoogde waarden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  en CaO in vergelijking met de andere geanalyseerde stalen van deze site. Niettemin blijft het aandeel van deze elementen beperkt en is FeO sterk vertegenwoordigd (meer dan 60%). Hierdoor lijkt de chemische samenstelling op deze van een doorsnee smeedslag dan een wandslag. Ter illustratie wordt in Figuur 33 (p. 65) het monster vergeleken met de *furnace lining* van Melsele – Brielstraat. De besproken slag is sterk gecontamineerd door de FeO in de smeedhaard. Een mogelijke verklaring kan zijn dat dit een fragment van een ovenwand is (en niet van een smeedhaard).



Figuur 26: Afbeelding van de geanalyseerde *furnace lining* bm3\_ws\_1. Bemerkt de restanten van de roodgebakken klei op de verglaasde slak.

- Erts

Het erts (bmx\_erts-ijzer\_\*) is afkomstig uit het spoor genummerd als “SM 91 B91-349 BB8 (2301) 4” (zie Figuur 27). Vanwege de lage chrono-stratigrafische resolutie van de site kon niet achterhaald worden of voor dit materiaal dezelfde datering geldt als voor het slakmateriaal. Vermits het op de site werd aangetroffen waar ook metallurgische activiteiten werden uitgevoerd, is het mogelijk dat beide verband houden met elkaar.

Na chemische analyse bleek al snel dat de identificatie als erts niet correct was. De ijzerwaarden van drie metingen uitgevoerd op twee verschillende monsters liggen te hoog om limoniet of een ander ijzererts te kunnen zijn ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  73 – 98%). De verhoogde  $\text{SiO}_2$ -waarde van het monster bmx\_erts-ijzer\_1 is te verklaren door het meten van een vervuilde zone. Vermoedelijk gaat het om een fragment sterk geoxideerd ijzer.



Figuur 27: Afbeelding van de “limoniet” uit spoor SM 91 B91-349 BB8 (2301) 4. Chemische analyse wees uit dat dit echter geen erts is, maar zeer sterk gecorrodeerd ijzer.

### 3.2.3. Interpretatie

De aanwezigheid van *tap slags* is een duidelijke aanwijzing van ijzerproductie op de site. Tijdens het archeologisch onderzoek werden geen sporen van een in situ bewaarde ovenstructuur aangetroffen, maar door de morfologische eigenschappen van de reductieslakken kunnen we met zekerheid stellen dat er werd gebruik gemaakt van een aftapoven.

De PCB-slakken en de *tap slags* werden samen met de *furnace lining* aangetroffen in één context waardoor beide kuilen als afvalkuilen beschouwd worden.

Het aantal reductieslakken is beperkt waardoor de productie vooral moet gediend hebben om aan de lokale noden te voldoen. De rendabiliteit van het proces kan afgeleid worden aan de hand van het gehalte FeO in de *tap slag*. Als regel geldt dat hoe lager het aandeel in FeO, hoe rendabeler het proces was. De geanalyseerde stalen bezaten een samenstelling tussen de 65 – 70% FeO. In de literatuur worden waarden tussen 40% en 70% genoteerd, waar FeO > 50% als hoog moet worden beschouwd (Pleiner 2000, 251). Hieruit kan geconcludeerd worden dat het reductieproces niet geoptimaliseerd of volledig onder controle was.

Fosfor is sterk aanwezig in de reductieslak (gemiddeld ca. 3%) en ook sporen van het element zijn in de smeedslakken aanwezig. Hierdoor kan verondersteld worden dat een fosforrijk erts werd gebruikt.

De planoconvexe smeedslakken zijn waarschijnlijk als raffinageslakken (*bloomery slags*) te interpreteren. De slakken zijn licht magnetisch – wat wijst op de aanwezigheid van metallisch ijzer – en vrij klein van afmeting. Beiden zijn kenmerken van een raffinageslak<sup>3</sup>. De homogene samenstelling, het gebrek aan gelaagdheid in de slak en de aanwezigheid van reductieslakken in dezelfde context verdedigen deze stelling. Ook de chemische analyse wijst deze richting uit door gelijkaardige gehalten aan Cr in de slakken. Hier moet wederom de opmerking gemaakt worden dat de relatie tussen de elementen zelden eenzijdig is.

Een analyse op de spoorelementen zou deze relatie meer kunnen onderbouwen.

---

<sup>3</sup> Persoonlijk commentaar prof. dr. Patrick Degryse

Afgaand op het slakmateriaal kan worden besloten dat zowel ijzerproductie als de eerste fasen van de raffinage (*bloomsmithing*) werd uitgevoerd op de site.

Door de lage opbrengst van het directe reductieproces zou men zelfs bij lokale ijzerproductie al een aanzienlijke hoeveelheid slakken verwachten. Het ontbreken hiervan doet vermoeden dat de ijzerproductie op de site slechts van korte duur was.

### 3.3. Melsele - Brielstraat

#### 3.3.1. Inleiding

In 2011 werd, naar aanleiding van een verkaveling, vlakdekkend onderzoek uitgevoerd in Melsele, Beveren, ter hoogte van de Brielstraat (percelen 873P en 874H) (zie bijlage 5). Het onderzoek besloeg een oppervlakte van ca. 1 hectare (Derieuw *et al.* 2012, 5-7). Op de site werden sporen van een bootvormig eenschepig woongebouw aangetroffen. Dit type huisplattegrond is kenmerkend voor de volmiddeleeuwse landelijke bewoning in de Kempen (zoals o.a. aangetroffen te Brecht-Hanepad en Hove-Hovener Veld). Tijdens deze opgravingen kwamen ook sporen en materiaal die in verband kunnen worden gebracht met metallurgische activiteiten aan het oppervlak. Het aantal vondsten was, in vergelijking met andere sites in het Waasland, relatief omvangrijk, waardoor er reeds stellig onderzoek naar werd gedaan (Derieuw *et al.* 2012, 41-45). De onderzoekers kwamen tot de conclusie dat het materiaal en de eventueel gerelateerde sporen te maken zouden hebben met smeedactiviteiten die binnen een afgebakende ambachtelijke zone valt.

Deze site werd als enige van de drie besproken sites “volledig” uitgewerkt of onderzocht. Er zijn op de site geen specifieke sporen aanwezig die wijzen op duidelijke ijzerproductie. Er werden geen ertsen op de site aangetroffen, maar de mogelijkheid tot ontginning van moerasijzererts is niet ongekend in de regio. Archeologisch onderzoek op de site Beveren – Viergemeet, ca. 2 km gelegen van de site in kwestie, stootte op restanten van lokale ijzeroerontginning. De ligging in een nat gebied en de verwerking van de lokale glauconiethoudende ondergrond zorgde voor de ontwikkeling van dit erts (Van Vaerenberg 2012, 11-12).

Pollenanalyse uit de waterput dichtst gelegen bij de bewoningssporen (spoor 6) toonde aan dat de site in de middeleeuwen gelegen was in een eerder moerassig gebied (els was de dominerende boomsoort, een teken van natte bosvegetatie), op de rand van het veen (Derieuw *et al.* 2012, 35). De analyse van de meest noordelijk gelegen waterput (spoor 205) toonde, net als waterput 6, aan dat het landschap in de beginfase van de waterput vrij dicht bebost was. Er was weinig invloed van menselijke activiteit (weinig cultuurgewassen of ruderalen aanwezig). (Derieuw *et al.* 2012, 36-37). De site kan zo verbonden worden met een vroege ontginningsbeweging van het eerder marginale landschap. In dit opzicht is het misschien niet verwonderlijk dat sporen van ijzerbewerking aanwezig zijn (zie *infra*).

### 3.3.2. Materiaal en analyse

Waterput 205, gelegen in het noordelijke deel van het terrein, werd door  $^{14}\text{C}$ -datering op het hout gedateerd tussen 1026 en 1180 cal. AD (Derieuw *et al.* 2012, 30-31). Deze waterput bevatte tevens een tuitpot van roodbeschilderd Rijnlands aardewerk, die gefragmenteerd verspreid was over verschillende lagen van de waterput. De datering van deze pot en ander keramiek bevestigt de  $^{14}\text{C}$ -datering. Waterput 6 (de meest westelijke waterput, dichtst bij de woning) is d.m.v.  $^{14}\text{C}$ -datering tussen 783 en 1032 cal. AD gedateerd (Derieuw *et al.* 2012, 33-34). Het aardewerk aan toont echter een meer aannemelijke datering tussen de 12e en de 13e eeuw.

#### Macroscopische studie

Drie planoconvexe smeedslakken (PCB) werden uitsluitend aangetroffen in waterputten 6 en 205. Daarnaast zijn nog drie vermoedelijke luchtinlaten aangetroffen in waterput 6. De slakken van het type SAS (*scorie argilo-sableuse*) komen meer verspreid voor. Als laatste werden nog verglaasde wandfragmenten aangetroffen in de greppel 314 ter hoogte van spoor 312. In totaal werd het materiaal gerecupereerd uit negen sporen (6, 8, 39, 41, 42, 54, 137, 205, 312, 314 en 327), goed voor een totaalgewicht van 6223g (Tabel 6).

Tabel 6: Totale gewichten van de metaalslakken aangetroffen op de site, naar Derieuw et al. 2012, 43.

	Gewicht (g)	%
<b>PCB</b>	4567	73,3
<b>SAS</b>	812	13,0
<b><i>Furnace lining</i></b>	854	13,7
<b>Totaal</b>	6233	100,0

#### - Smeedslakken

Er zijn drie planoconvexe smeedslakken (PCB) aangetroffen op de site. Twee zijn afkomstig uit de waterput met spoornummer 6, laag a en b, de laatste is afkomstig uit de waterput met spoornummer 205, laag b. Alle drie zijn ze uit de bovenste lagen van de waterput gerecupereerd. De drie massieve smeedslakken zijn goed voor 73,4% van het totaalgewicht slakken opgegraven op de site.

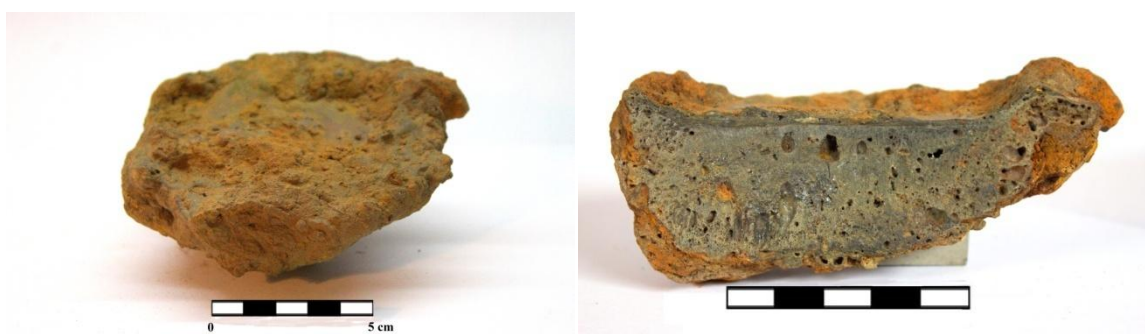


Figuur 28: Afbeelding van een planoconvexe smeedslak uit waterput 205 (mls205\_pcb). Links: het zijaanzicht toont de halfconvexe vorm van de slak. Rechts is de wand van de smeedhaard goed zichtbaar.

Figuur 28 toont een smeedslak die met de smeedhaard is samengesmolten. Deze vorm werd bekomen door de toevoeging van een schuine luchtstroom met een laag debiet, zoals voorgesteld in Figuur 8 p.24, de meest rechtse afbeelding. Vermoedelijk werd gebruik gemaakt van een kleine blaasbalg.

De drie smeedslakken hebben een lichtrood geoxideerde laag en zijn goed magnetisch op verschillende plaatsen onderaan de slak. Indrukken van houtskool en de zandige ondergrond zijn zichtbaar onderaan de slak. De bovenzijde is overwegend glazig met licht tot donkergrijze kleuren. De PCB uit spoor 205 meet 13cm op de lange zijde en 16cm in de breedte.

De PCB uit spoor 6b is vergelijkbaar met de hierboven beschreven smeedslak, en is tevens deels samengesmolten met de haardwand. De slak meet 13cm in de lengte en 8cm in de breedte.



Figuur 29: Afbeelding van een PCB uit spoor 6a (mls6\_pcb\_1). Links is de bovenzijde zichtbaar, terwijl rechts een foto van de doorsnede op de langste zijde zichtbaar is.

Figuur 29 toont de smeedslak aangetroffen in spoor 6a. Deze PCB heeft een ronde vorm, vergelijkbaar met de PCB's aangetroffen op de site Gent – Nieuwe Beestenmarkt. De slak



heeft een geschatte porositeit van 15%, en is qua beschrijving gelijkaardig aan de voorgaande slakken. In de doorsnede is een gelaagdheid zichtbaar, wat erop wijst dat verschillende smeedbewerkingen werden uitgevoerd in een enkele smeedactiviteit.

Naast de planoconvexe smeedslak, is nog een ander type smeedslak op de site geattesteerd. Het betreffen slakken van het type SAS of *scorie argilo-sableuse*. Deze worden in het opgravingsverslag als “sinters” gecategoriseerd, wat ze volgens de gebruikte definitie van het woord koppelt aan het reductieproces. Het is echter duidelijk dat het niet om agglomeraten van slak, houtskool en ongereduceerde erts gaat. Vermits er tevens geen sporen van het reductieproces aanwezig zijn op de site, behoren de slakken hoogstwaarschijnlijk tot de post-reductiefase.

De gelijkenis met ijzerconcreties die vaak in zandgronden voorkomt heeft de telling ook gecontamineerd, er valt immers moeilijk onderscheid tussen beide te maken in het veld. Zo werd na controle minstens 85g als ijzerconcretie gekwalificeerd.

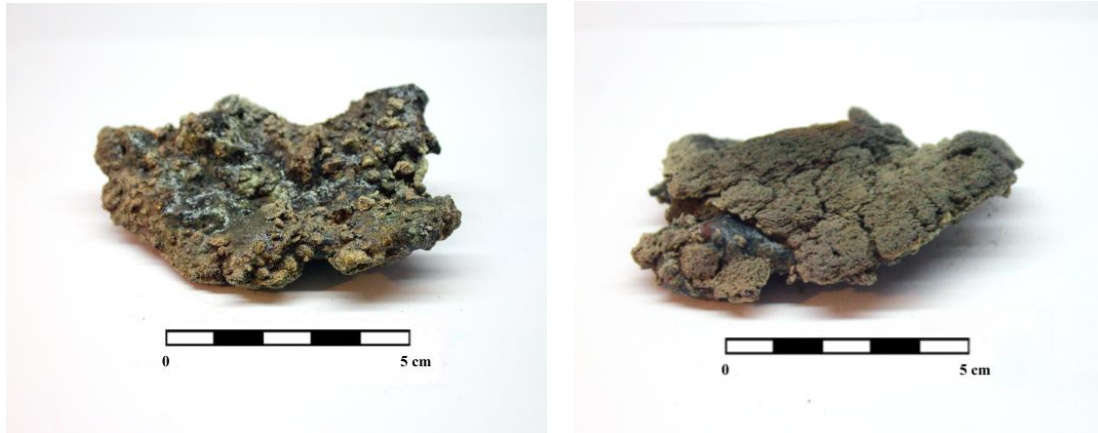


Figuur 30: Afbeelding van enkele smeedslakken van het type SAS uit spoor 314 (mls314\_sas).

De slakken zijn niet magnetisch en hebben een vrij lage densiteit, te wijten aan het kleine aandeel ijzeroxide in de slak en een verhoogde porositeit. Onder de oranje zandige oxidelaag is een beige tot groenige kleur waar te nemen die op enkele plaatsen een glazige textuur kan aannemen. In totaal werden 39 slakken van dit type macroscopisch onderzocht, waarvan de grootste slakken niet groter dan 6cm meten. Ze zijn goed voor 13% van het totaalgewicht van de slakken opgegraven op de site.

- Furnace lining

Er werden 37 wandfragmenten aangetroffen in spoor 314. Vijf fragmenten kwamen uit spoor 54 en een enkele werd aangetroffen in spoor 42.



Figuur 31: De afbeelding toont de boven- (links) en onderzijde (rechts) van de *furnace lining* afkomstig uit spoor 54 (mls54\_ws\_1).

Figuur 31 toont een fragment van de *lining* afkomstig uit spoor 54. Door de hitte is de bovenzijde van de wand volledig verglaasd. Dit gebeurt bij temperaturen die 1100°C overschrijden (Anderson *et al.* 2003, 148). De kleur varieert van wit tot groenblauw aan de bovenzijde en een grijsgebakken poreuze klei aan de onderzijde. Deze textuur is ook op te merken bij de reeds besproken PCB-slakken waar de slak samengesmolten was met de ijzerslak. Het bleek niet mogelijk de om verschillende fragmenten weder aan te passen.

In totaal werd 854g van dit materiaal aangetroffen in drie sporen.

- Tuyère

In totaal werden drie vermoedelijke fragmenten van een *tuyère* aangetroffen die allen afkomstig zijn uit de diepere lagen van waterput 6 (lagen c, c/f, e).

Figuur 32 toont het meest volledige fragment, aangetroffen in spoor 6c. Net als het fragment uit laag c/f is de gele klei sterk gebakken en heeft ze een poederige structuur. De klei is licht verschraald met een fijn zand.

Het fragment uit laag e heeft een andere textuur dan deze twee fragmenten. Ze is gemaakt uit een grijs/beige bakkende klei en is met schelpfragmenten verschraald. Het fragment heeft meer de vorm van een langgerekt gootje dan van een cilinder.



Figuur 32: Tuyèrefragment uit spoor 6c (mls6\_tuyere\_2)

### Chemische analyse

Vermits de meetapparatuur niet voorzien was op grote stalen, konden de PCB-slakken niet worden geanalyseerd. Wegens de sterke oxidelaag op de slakken van het type SAS werd er geopteerd om enkel de *furnace lining* te onderwerpen aan een chemische analyse.

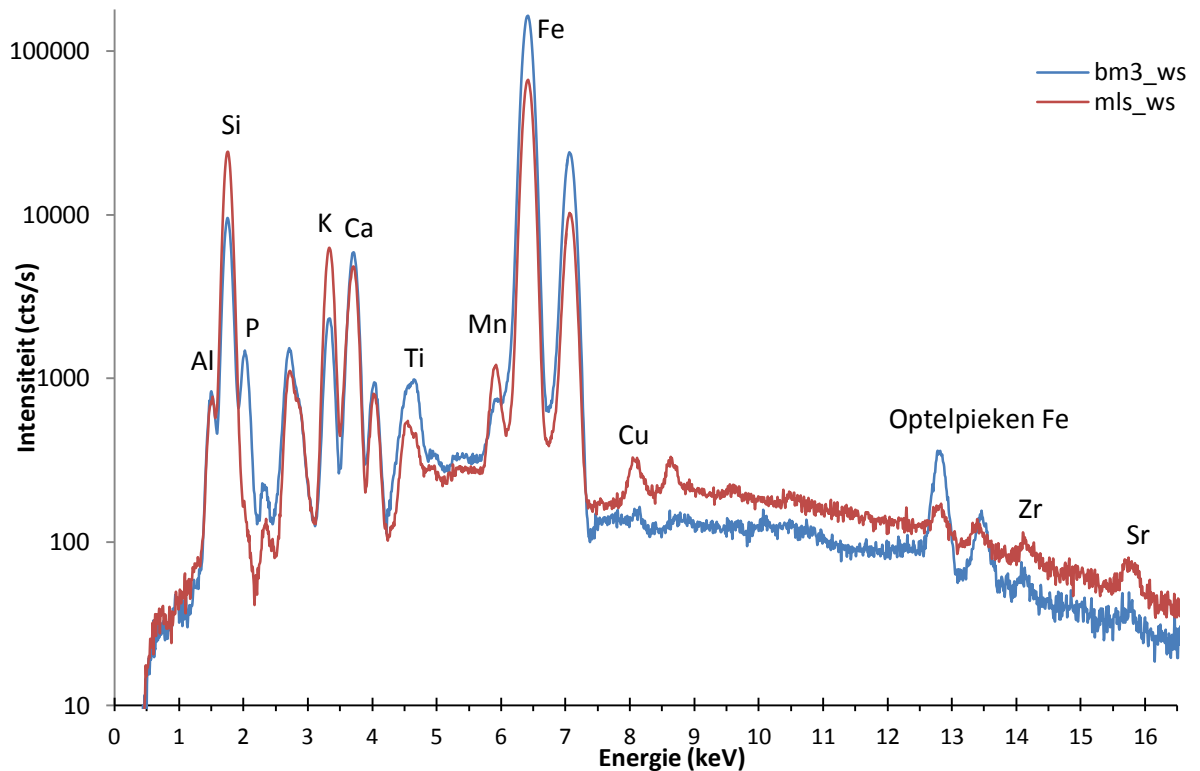
#### - *Furnace lining*

Tabel 7: Tabel met de gemiddelde resultaten van de chemische samenstelling van de *furnace lining* uit spoor 54 (Figuur 31). Zie bijlage 4 voor de volledige resultaten

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
mls_54_ws_1	n.d.	2,92	60,28	n.d.	n.d.	6,94	4,52	0,270	n.d.
	MnO	FeO	CuO	ZnO	SrO	ZrO <sub>2</sub>			
	%	%	%	%	%	%			
mls_54_ws_1	0,376	24,38	0,095	0,154	0,107	0,169			

De chemische samenstelling van de haardwand uit spoor 54, is een voorbeeldsamenstelling (zie ook bijvoorbeeld Anderson *et al.* 2003, 151). De samenstelling wordt gedomineerd door SiO<sub>2</sub> (ca. 60%). Meestal kan het gehalte aan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oplopen tot 10%, maar in dit geval overschrijdt het de 3% niet. Het FeO-gehalte is variabel en is te wijten aan de contaminatie van het ijzer tijdens de bewerkingen. Verhoogde CaO waarden zijn te wijten aan de fusie tussen de as van de brandstof en de (eventueel kalkhoudende) *furnace lining*.

Interessant is ook de detectie van de waarden CuO en ZnO. Sporen van deze elementen zijn vaak in verband te brengen met het bewerken van andere metalen in de smeedoven.



Figuur 33: De XRF-spectra van de *lining* uit de site Melsele – Brielstraat (rood) en Gent – Nieuwe Beestenmarkt worden vergeleken. Bemerkt de verschillen in intensiteit voor Si, K en Fe. Naast deze elementen vallen de afwezigheid van P bij Melsele – Brielstraat enerzijds en de afwezigheid van Cu bij Gent – Nieuwe Beestenmarkt direct op.

### 3.3.3. Interpretatie

Het materiaal uit de site wijst duidelijk in de richting van smeedactiviteiten. Er werd geen materiaal aangetroffen die kan geassocieerd worden met de productie van ijzer.

De drie planoconvexe smeedslakken stellen elk één dag werk voor. Immers, de haard werd schoongemaakt na een dag werk aan de smeedoven. Het massieve karakter van deze drie slakken doet wel vragen oprijzen of deze regel correct is, maar niettemin kunnen we – mede door het beperkte aantal slakken op de site – stellen dat het smeden extensief werd beoefend en dat het om een nevenactiviteit van de bewoners van de nederzetting ging.

Deze site wordt geïnterpreteerd als een ontginningsnederzetting (Derieuw *et al.* 2012, 37) en het is in dit opzicht niet ook verwonderlijk om de bewerking van ijzer hier aan te treffen als nevenactiviteit.

De vroege bewoners die dit marginaal gelegen gebied ontgonnen en onder cultuur brachten moeten een relatief sterk autarkisch bestaan hebben gekend. IJzer was een onontbeerlijk

materiaal voor het maken van landbouwgereedschappen en andere gebruiksvoorwerpen (bijlen, ploegschoenen, sikkels, dolken, kettingen, karrewielen, ...) en werd met voorzichtigheid behandeld en vaak hersteld of gerecycleerd.

De smeedslakken van het type SAS die fragmentarisch maar veelvuldig werden aangetroffen op de site, zijn gekoppeld aan bewerkingen als vuurlassen. Deze smeedtechniek wordt vaak gebruikt bij het uitvoeren van herstellingen van (landbouw)gereedschap. Deze slakken kunnen aldus geïnterpreteerd worden als restanten van korte smeedbewerkingen voor onderhoud.

De drie planoconvexe slakken omvatten smeedbewerkingen van langere duur, zoals recyclage of vormgeving van een ijzeren object. Een van de PCB-slakken vertoont een subtiele gelaagdheid in de doorsnede, wat erop wijst dat verschillende bewerkingen werden uitgevoerd in een enkele smeedactiviteit.

Het geanalyseerde fragment *furnace lining* bevatten een klein doch duidelijk aandeel CuO (ca. 0,1%), wat kan wijzen op de bewerking van koperlegeringen in de smeedhaard.

De onderzoekers van de site spreken van een ambachtelijke zone die begrensd werd door een halvemaanvormige greppel (spoor 314) en de greppel met spoor 37 (Derieuw *et al.* 2012, 43; zie bijlage 5)). Ze bakenen gezamenlijk een gebied af van ca. 25 x 25m. Paalspoor 33 en kuil 312 die binnen deze zone vallen leverden beide een houtskoolrijke vulling met fragmenten van verbrande leem op, die kunnen geassocieerd zijn met metallurgische activiteiten. Het scherfmateriaal afkomstig uit kuil 312 dateert uit de 11<sup>e</sup> tot 12<sup>e</sup> eeuw. Vermits spoor 314 het grootste aandeel van haardfragmenten bevatte, is het mogelijk dat er zich nabij dit spoor een smeedhaard heeft bevonden.

## 4. Conclusie van de analyses

Het residu van ijzerbewerking en –productie uit drie verschillende sites, elk in hun eigen context (in volgorde van analyse: landelijke abdijeconomie, stedelijke (abdij-)economie en landelijke ontginningsnederzetting), werd in dit deel van de verhandeling besproken en geanalyseerd.

Door het toepassen van archeometallurgische technieken op de voornaamste vondsten gerelateerd aan metallurgie, d.i. de ijzerslak, werd getracht een inzicht te krijgen op de gebruikte technieken, de economie en de sociale organisatie van de drie middeleeuwse sites. Hoewel de slakken van alle drie de sites uit secundaire contexten komen, zijn ze niettemin een teken van een nijverheid die in een veranderende economische periode veel betekende.

Al snel bleek dat de slakken niet onderworpen kunnen worden aan een eenzijdig onderzoek. De slak dient in zijn volledigheid te worden bekeken en louter macroscopisch onderzoek is onvoldoende om de verschillende stappen van de *chaîne opératoire* van elkaar te onderscheiden. De morfologische kenmerken en uitwendige structuur, alsook de chemische samenstelling dienen samen te worden bestudeerd om gegronde interpretaties te maken over de site.

De chemische analyse van het fragment bm3\_ws\_1 laat zien dat de meting niet los kan staan van een macroscopische analyse. Het monster toonde in de chemische samenstelling grote gelijkens met een smeedslak, maar werd door macroscopische analyse duidelijk geïdentificeerd als een fragment van de *furnace lining*.

Een chemische bulkanalyse door middel van een XRF-analyse is bruikbaar gebleken, maar heeft tevens zijn beperkingen. Een analyse van de spoorelementen is vereist om een meer doorgedreven onderzoek te doen naar de relatie tussen het erts en de reductieslak, en tussen de reductieslak en de raffinageslak.

Daarnaast kent de XRF-meting op een heterogeen staal (vnl. smeedslakken) beperkingen. Hoewel deze illustratief is gebleken voor een ruwe schatting van de samenstelling en de aanwezigheid van nevenelementen, wordt de heterogeniteit van de slak niet – althans niet volledig – weerspiegeld door het nemen van twee analysepunten. Een foutenmarge van ca. 10% dient in rekening te worden gehouden bij de metingen, waardoor de resultaten onbetrouwbaar en dus moeilijk te vergelijken zijn met de literatuur. De homogene stalen (vnl.

reductieslakken) kennen dit probleem niet en geven blijk van een goede reflectie van de chemische samenstelling. Deze stalen dienen desgevallend niet te worden verpoederd.

## **Deel III: Het ijzer in een breder middeleeuws beeld**





## Inleiding

*It may be as many sing,  
Gold is over all men king  
Yet if truth be told  
'Tis with iron men win gold...*

*Citaat uit Sim 1998, p. V*

Wanneer men een archeologisch verhaal vertelt is het minstens even belangrijk om dit in een historisch kader te schetsen. Immers, archeologie biedt slechts één bepaalde kijk door het venster van het verleden en het is bij een archeologisch onderzoek belangrijk om historische bronnen te raadplegen. Dit zal in dit laatste deel van deze verhandeling gedaan worden. Er wordt een breder economisch en maatschappelijk beeld geschetst waarin de smid en/of ijzerproducten werkzaam was. Hoe was de stedelijke ambacht en economie georganiseerd? De drie besproken sites en het bredere archeologisch beeld tonen aan dat er slechts een relatief kleine lokale productie bestond in het graafschap. Waar kunnen we deze aantreffen, en waar kwam het ijzer dan wel grotendeels vandaan?

Vooraf deze laatste vragen kunnen worden beantwoord door de studie van toltarieven in de grote steden. Naast ijzer wordt ook nog stilgestaan bij de herkomst van de steenkolen, een goedkope brandstof t.o.v. houtskool die in de middeleeuwen voornamelijk van belang was voor de (stedelijke) smeden.

## **1. Middeleeuwse innovatie**

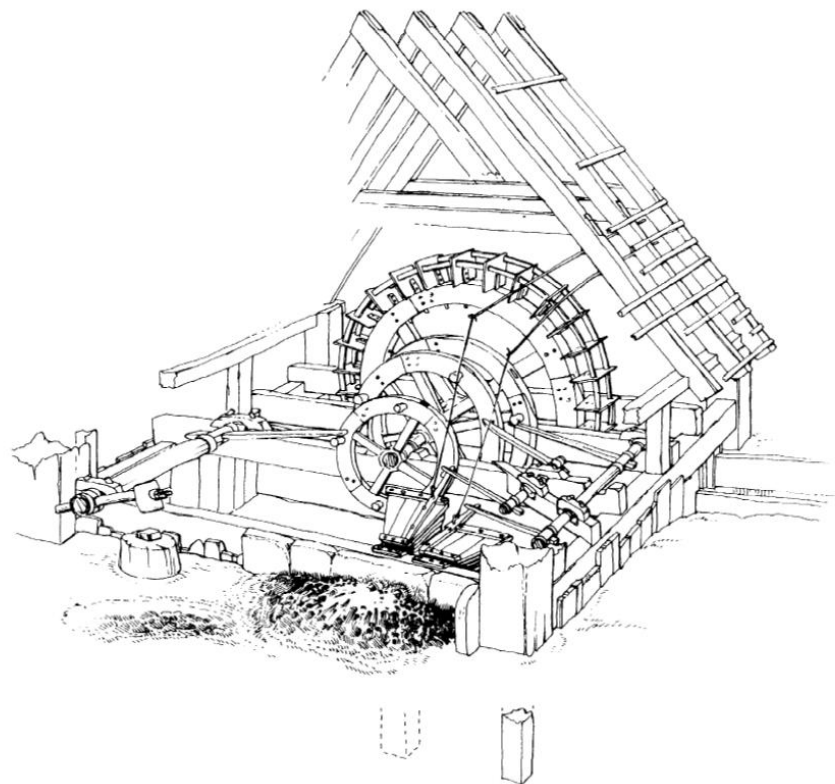
De ontwikkelingen en innovatie op vlak van ijzerproductie werden sterk gestuurd door de economische en demografische ontwikkelingen die in de volle middeleeuwen plaatsvonden. Vanaf de 10<sup>e</sup> eeuw zien we door de stijgende bevolkingsdruk een geleidelijk de inname van marginale en beboste gebieden (Blockmans, Hoppenbrouwers 2009, 157). Deze ontginningsbeweging, met vooral de systematische landontginning in de 11<sup>e</sup> – 12<sup>e</sup> eeuw onder de Vlaamse graven en abdijen (vnl. de Cisterciënzers) als hoogtepunt, had nood aan ijzeren werktuigen voor zowel boskap en landbouw. Grote bosmassieven uit de vroege middeleeuwen verdwenen onder het scherpe blad van de bijl, en het ontginnen van gronden met een laag agrarisch rendement dwongen boeren tot innovatie. Deze technologische innovaties waren sterk geënt op het ijzer. De risterploeg bijvoorbeeld, die vanaf de 11<sup>e</sup> eeuw in gebruik werd genomen, bestond uit twee ijzeren onderdelen, de schaar en het kouter (Blockmans, Hoppenbrouwers 2009, 155). Ook gereedschappen voor houtbewerking en steenhouwen, beslag voor wielen, assen voor karren, hoefijzers en bidden voor de paarden, ankers en (klink)nagels voor de scheepsvaart in de steeds toenemende handel vroegen ijzer in aanzienlijke hoeveelheden (Nef 1952, 703).

Van alle afzetmarkten is de militaire markt degene die het meest tot de verbeelding spreekt en die ook het best gedocumenteerd is. Standaardvoorwerpen zoals mailiënringen of pijlpunten werden meestal lokaal geproduceerd, maar wanneer kwaliteitsvol staal werd gezocht, werden importen uit Spanje en Zweden meest geëerd (Crossley 1981, 29).

De stijgende vraag naar ijzer dwong ook de producenten tot innovatie. Een grote stap in de productie was de aanwending van waterkracht. Watermolens werden gebruikt om verschillende grote blaasbalgen te bekrachtigen. Hierdoor kon een veel grotere, quasi continue, luchtstroom in de laagoven geblazen worden, en grotere ovens konden worden aangedreven. De watermolen werd ook in de smidse gebruikt (zie Figuur 34). De aangedreven staarathamers konden op een korte tijd grote hoeveelheden ijzer verwerken. Ook bij de raffinage van de wolf – een lang werk van opwarmen en behameren – mag de efficiëntie en tijds winst niet worden onderschat.

Het lijkt erop dat waterbekrachtigde ovens gedurende de 16<sup>e</sup> en 17<sup>e</sup> eeuw op plaatsen waar waterkracht en erts aanwezig zijn, veelal evolueerden naar hoogovens. Het lijkt er echter op dat laagovens in verschillende delen van Europa bleven voortbestaan tot de 19<sup>e</sup> eeuw.

Aan de toevoeging van waterkracht wordt vaak een sleutelrol toebedeeld. Door een continue sterke luchtstroom bereikten de ovens een punt waar, in bepaalde gunstige omstandigheden, de koolstof en het ijzer konden omgevormd worden tot cementiet (een ijzer-koolstof legering met 6,7% koolstof). Deze legering heeft een lagere smelttemperatuur dan ijzer, en kon dus in vloeibare toestand voorkomen in de laagoven. Het is waarschijnlijk dat dit aanvankelijk toevallig gebeurde en dat men dit gietijzer als een mislukking of als afval beschouwde omdat het niet smeedbaar bleek. Bronnen uit Noord-Italië daterend uit de 13<sup>e</sup> – 14<sup>e</sup> eeuw spreken over dit gietijzer als “*ferrum coctum*”. Ook in Oberpfalz en Stiermarken van het Heilig Roomse Rijk was het vloeibare ijzer sinds de 14<sup>e</sup> eeuw bekend (Stroobants 1978, 58). De hoogoven wordt vanaf 1400 vermeld voor huidig Wallonië, waar een verbeterde techniek ontwikkeld wordt dat de naam *Walloon Proces* krijgt (Pleiner 2000, 283). Verschillende schilderijen zoals deze van Henri Met de Bles (ca. 1500/1510-1550) en Jan Bruegel de Oude (1568-1625) tonen deze met waterkracht aangedreven hoogovens uit Wallonië.



Figuur 34: Reconstructie van een 12<sup>de</sup> eeuwse waterrad uit de Abdij van Bordesley (Verenigd Koninkrijk).  
Uit Astill 1993, 270: fig. 177

## 2. Cisterciënzers en ijzerproductie

De Cisterciënzereconomie was een ruraal gebaseerde economie met een nadruk op zelfvoorzienigheid. Deze zelfvoorzienigheid evolueerde quasi altijd naar een surplusproductie die het eigen gebruik sterk oversteeg (Burton, Kerr 2011, 182). Deze surplusproductie gold ook voor de productie en bewerking van ijzer, hoewel deze activiteit een eerder extensieve karakter had (Burton, Kerr 2011, 181).

Metallurgische activiteiten uitgevoerd door de monniken van de orde van Cîteau zijn voornamelijk in Engeland goed bestudeerd. Vooral de Abdij van Bordesley (Worcestershire, England) is goed onderzocht. Hier werd een atelier aangetroffen dat zich verschillende eeuwen intensief bezighield met het bewerken van ijzer en andere metalen (zie ook Figuur 34). Onderzoek bleek uit dat het ijzer die gesmeed werd niet enkel voor eigen gebruik op de abdij zelf was, maar ook de verschillende *grangiae* onderhield en produceerde mogelijk zelf voor de lokale markt (Astill 1993, 295-296).

Niet enkel ertsontginningen, maar ook de ontginning van steenkolen behoorde tot de activiteiten (Burton, Kerr 2011, 181). Dit was onder andere het geval voor de abdijen van Newbattle en Culross (Schotland). Met name Culross onderhield een grote export en zette tweehonderd schepen aan het werk om deze ladingen te verschepen naar Groot-Brittannië en het Europese vasteland.

De monniken verzorgden echter enkel de *ora*. Voor de *labora* werden conversen - eenvoudige lekenbroeders – ingeschakeld. Deze onbetaalde arbeidskrachten verzorgden de directe exploitatie van het land, en staan onder meer aan de basis van de verrijking van de Orde. De *Fabri lignarii et ferrarii quoque et muratores*, lekenbroeders als die onder andere actief waren in de bewerking van ijzer, komen als vroeg in de historische bronnen voor (Stroobants 1978, 102).

## 3. Organisatie van de stedelijke smeden

Vanaf de 11<sup>e</sup> eeuw ontstonden in de steden de eerste ambachtsbroedersschappen. De echte smedengilden of de gilden van Sint-Elooi komen vanaf de 13<sup>e</sup> eeuw voor in Mechelen, Gent, Brugge, ... (Stroobants 1978, 164).

De smeden in de steden hadden vaak verschillende privileges. Een van deze was het keuren, het “waerderen”, van het ingevoerde ijzer en steenkolen (Stroobants 1978, 92-93). Ook in Antwerpen bestond een privilege uit 1434 die bepaalde dat niemand ijzer beneden de 20 pond

(ca. 9 kg) mocht verkopen, tenzij deze lid was van de smedengilde. De Brugse smeden kregen een gelijkaardig privilege van Maria van Bourgondië in 1477. De gilden verwierven zo geleidelijk aan meer en meer controle en macht over de ijzerhandel, en zorgde ervoor dat zij het monopolie hierop konden verwerven en consolideren.

Voornaamste leden van de smedenambacht (te Gent) waren (Stroobants 1978, 165-211):

De mes –en schaarmakers, slotmakers, batelrie (balansmakers, ketelaars/makers, klok- en geelgieters), zwartwerkers (grofsmeden, bv. voor het beslag voor schepen), spoor- en toommakers (d.i. de uitrusting van de paarden) samen met zadelmakers, nagelmakers, hoefsmeden, witwerkers (gereedschapssmeden), bus- en wapenmakers (respectievelijk vuurwapens vanaf 16<sup>e</sup> eeuw en de wapenmaker met hoofdzakelijk onderverdeeld in zwaardvegers en harnasmakers), stalen boogmakers (de kruisboog), hekelmakers, elsenmakers (vnl. schoenmakersgereedschap) en spilmakers.

## **4. Handel**

### **4.1. IJzer**

“It is rightly pointed out that iron was expensive in the Middle Ages, but it was of course indispensable, and while almost any local ore could be used for edging agricultural tools and wheels, and for making nails, horseshoes, or keys, the interests of the ruling groups demanded particularly good iron in quantity for war materials, ship-building, great domestic and church buildings, and decorative work.” (Childs 1981, 25).

#### **4.1.1. Lokaal**

Het is duidelijk dat het studiegebied niet over de erts en hydrografie beschikt om een productie van grote schaal te ondersteunen. Ook de mindere beschikbaarheid van hout, zeker naar de late middeleeuwen toe, speelt hierin een rol. Aldus krijgen we een beeld van een verspreide kleinschalige ijzerproductie die voornamelijk de lokale noden moesten vervullen. Archeologisch onderzoek heeft deze stelling (nog) niet kunnen bijstellen, en de blijvende afwezigheid in de archeologische data van structuren die in verband kunnen gebracht worden met productie bevestigen dus enkel deze visie.

De Antwerpse Kempen, meerbepaald de streek rond Herentals, zijn in het opzicht van lokale productie interessant. Mogelijk werd hier vanaf de 15<sup>e</sup> eeuw ijzer op (supra)lokale schaal

geproduceerd. Vermoedelijk voorzag het in de eerste plaats de streek in de vraag naar ijzer die uit lokaal gewonnen moerasijzererts en ijzerzandsteen gewonnen werd. De ontginning van het ijzeroer is voor de Antwerpse Kempen historisch gedocumenteerd vanaf de late middeleeuwen tot het begin van de 20ste eeuw (Stroobants 1978, 102; Meylemans *et al.* 2007, 115). Zo staat op de kaart van het *Dépôt de la Guerre* uit 1870 bij de Kempense Heuvelrug de naam *Mine de fer* vermeld, een plaats waar het erts nog steeds dagzoomt. Het ijzer, *Heerentals yzere*, komt sinds 1509 sporadisch voor in de rekeningen van Antwerpen, en werd van daaruit verder verhandeld (De Smedt 1954, 391). Ook in de bronnen voor de Sint-Baafskathedraal te Gent werd in 1551 aangedrongen op het gebruik van dit ijzer (Algemeen Rijksarchief Gent: Bisdom Gent, Sint-Baafskathedraal, R.21). Dat het ijzer in Herentals zelf werd geproduceerd, of dat deze stad als stapelplaats diende voor het ijzer geproduceerd in de Kempen valt niet uit de bronnen aan te wijzen.

Verder archeologisch en een doorgedreven bronnenonderzoek zou zekerheid kunnen scheppen omtrent deze productie en zou mogelijk de (verschillende?) centra kunnen traceren.

In dat opzicht is het ook interessant om de houtskoolproductie gedocumenteerd voor het Zoerselbos te vermelden (Boeren *et al.* 2009). Hier werden drie periodes van houtskoolproductie gedocumenteerd die samengaan met de geografische spreiding van de mijlers, 1280 – 1420, 1400 – 1600 en na 1650 (Boeren *et al.* 2009, 42). Vermits dit bos zich slechts een 15-tal km van Herentals situeert, is het verleidelijk om een verband tussen de houtskool en de ijzerproductie te poneren.

De vroegmiddeleeuwse site van Nijlen-Mussenpad, opgegraven door Archaeological Solutions in 2008 en een 10-tal km verwijderd van Herentals, is ook interessant te vermelden. In twee waterputten werd een totaal van ongeveer 54 kg ijzerslakken aangetroffen, waarvan ca. 62% bestaat uit PCB (smeedslakken) en ca. 7.5% uit slakken gerelateerd met reductie (Bourgeois *et al.*, in druk). Onderzoek wees uit dat er zowel productie uit lokale ertsen (ijzerconcretie-zandsteen) als raffinage op de site plaatsvond die de lokale vraag veruit oversteeg en dus op ook handel gericht was. De vraag over een bepaalde continuïteit in de middeleeuwen kan worden gesteld, maar vermits er voor de site geen sporen uit de 10<sup>e</sup> tot 15<sup>e</sup> eeuw zijn, blijft het antwoord speculatief.

Voor de drie grote steden – Antwerpen, Gent en Brugge – leiden we uit historische bronnen af dat pas vanaf de 19<sup>e</sup> eeuw een echte lokale ijzerproductie plaatsvond. Zowel de erts als de brandstof diende in deze gevallen te worden ingevoerd, iets wat pas rendabel werd met de

uitputting van het ijzererts in Wallonië. Dan pas konden de steden concurreren met de daar gevestigde industrie (Stroobants 1978, 103-104).

#### 4.1.2. Import

Wanneer we de import van ijzer bekijken, zijn we aangewezen op de toltarieven uit de verschillende grote Vlaamse steden. De eerste documenten dateren uit eind 12<sup>e</sup> – begin 13<sup>e</sup> eeuw. Het tolreglement uit Gent spreekt over een belasting per schoof staal of ijzer van een obool (gewichtseenheid). Voor Brugge wordt zelfs de herkomst van het ijzer vermeld, namelijk het “*royaume d’Alemaigne*” en het “*royaume de Castele*”, respectievelijk Duitsland en Spanje, twee plaatsen die gedurende de middeleeuwen belangrijk blijven voor hun ijzerimport (Stroobants 1978, 89). Door een gunstig handelsprivilege voor de Engelse kooplieden uitgevaardigd door Hertog Jan II van Brabant, komt Engels ijzer zeker vanaf de tweede helft van de 13<sup>e</sup> eeuw op de Antwerpse markten terecht, waarschijnlijk al vroeger. Ook een verdrag gesloten tussen de aartsbisschop van Keulen en de hertog van Brabant in 1279 zorgde ervoor dat verschillende metalen gemakkelijker over de Maas en de Rijn konden worden vervoerd.

Het Spaanse ijzer werd sterk boven al het andere importijzer verkozen vanwege de uitstekende kwaliteit, zo zelfs dat er in de 14<sup>e</sup> en de 15<sup>e</sup> eeuw discriminerende maatregelen werden genomen ten opzichte van “Breymisch yser” uit Duitsland en ijzer uit Henegouwen (Stroobants 1978, 94). Dit Spaans kwaliteitsmetaal werd in het noordwesten van Spanje en Baskenland ontgonnen en vanuit Bilbao aangevoerd. De bestellingen konden enorme proporties aannemen, en dan vooral in tijden van oorlog. Zo kocht het Brugse stadsbestuur tussen 1344 - 1345 zo’n 150.000 pond van dit Spaanse ijzer (Stroobants 1978, 94).

Het Duits ijzer waarvan al in 13<sup>e</sup> eeuwse bronnen gesproken wordt had verschillende centra van herkomst en voorzagen o.a. Brugge en Gent van ijzer en staal. Tussen de Elbe en de Rijn zijn verschillende productiecentra gelegen. Het “Breymisch yser” vermeld in de toltarieven is, met tussenhandel in Bremen en Hamburg, afkomstig uit het Weserbergland (Stroobants 1978, 53). Ook het Sauerland had tijdens de middeleeuwen een bloeiende ijzerproductie die teruggaat tot de Karolingische periode. Via Keulse kooplieden – de stad vervulde overigens de functie van stapelplaats – werd het in onze streken verhandeld (Stroobants 1978, 96). Dit ijzer wordt ook in de toltarieven van Damme uit 1252 vermeld en bereikte Brugge dus via het Zwin (Stroobants 1978, 97).



In dit zelfde toltarief wordt ook een eerste vermelding gemaakt van het Zweeds ijzer. Het kwalitatieve materiaal komt in de documenten naar voor onder de naam *osmund* en was een vrij goedkope soort ijzer vanwege de geringe raffinage die het onderging. Het won echter vooral aan belang sinds de 16<sup>e</sup> eeuw, waar het in onze gewesten als ijzer van eerste kwaliteit werd aanzien, vergelijkbaar met het Luikse ijzer (Stroobants 1978, 98; *ibid.* 1985, 275).

Naast deze drie grote productiegebieden werd ook ijzer ingevoerd afkomstig uit gebieden die binnen de huidige Belgische grenslijnen vallen. Vanaf de late middeleeuwen en vooral de late 15<sup>e</sup> -16<sup>e</sup> eeuw zijn de productiecentra van Entre-Sambre-et-Meuse (en Graafschap Namen) en Henegouwen op vlak van de indirecte methode een van de beste in Europa (Stroobants 1978, 98). Deze regio's kenden immers een relatief overvloedig aanbod van de drie nodige grondstoffen, namelijk hout, water en uiteraard ijzererts. Vooral Luik, Namen, Binche, Bergen, Chièvres en Bauffe deden dienst als belangrijke verzamelpunten voor de handel naar Frankrijk en de Vlaamse steden, waarvan de laatste op hun beurt weer een groot deel als bulkgoederen doorverhandelden (Stroobants 1978, 98).

Deze ijzerproductie werd reeds op “industriële” schaal uitgevoerd sinds de komst van de Romeinen. Er zijn uit deze periode verschillende productiecentra verondersteld tussen Sambre en Maas, en in de valleidalen van de Ourthe en de Vesder (Stroobants 1978, 86; De Laet, Doorselaer 1969, 9). De zgn. “Crayats de Sarrasins”, dit zijn grote bergen bestaande uit ijzerslak, zijn ten minste terug te dateren tot de Romeinse tijd en tonen de grootschaligheid van deze productie. Helaas werden deze slakken in 19<sup>e</sup> eeuwse hoogovens gerecycleerd vanwege hun hoog ijzergehalte zodat een schatting van de productie niet mogelijk is (Stroobants 1978, 86).

De 13<sup>e</sup> eeuwse spilfunctie van de Vlaamse steden mag niet onderschat worden in de Europese ijzerhandel. Brugge bezat tot in de 16<sup>e</sup> eeuw het stapelrecht op Spaanse ijzer, waarna het werd verhandeld in het graafschap en verder (Stroobants 1978, 93). Ook blijkt Engeland, ondanks een relatief grote eigenproductie (Weald, Forrest of Dean, waar bij de ontginning ook een groot aantal Cisterciënzerkloosters betrokken waren), een van de afnemer te zijn van ijzer die via Vlaamse steden werd verhandeld (vooral Antwerpen) (Childe 1981, 34). Na de epidemieën van de 14<sup>e</sup> eeuw en de overexploitatie van de Engelse bossen voor de productie van houtskool, werd het ijzer meer en meer een importproduct, die vanuit verschillende delen van Europa afkomstig was (Hongarije, Polen, Zweden en, tot halverwege de 15<sup>e</sup> eeuw, Bretagne) (Stroobants 1978, 54). Het leeuwendeel van de 15<sup>e</sup> eeuwse Engelse invoer bestond

echter uit Spaans ijzer, dat goed was voor 90 procent van het totaal geïmporteerde ijzer (Childe 1981, 46). Dit ijzer werd rechtstreeks of via de Vlaamse steden verkregen.

De manier waarop het ijzer werd verscheept is niet duidelijk af te leiden uit de documenten. Ze vermelden eerder het gewicht dan de vorm waaronder ze werden verscheept. Hier kan de archeologie wel een beter licht op werpen. In *Deel I* werd reeds vermeld dat de ruwe wolf kon worden verhandeld (zie 5.3.1 Wolf/Loupe/spons). Het is onwaarschijnlijk dat het erts zelf werd verhandeld. Dit zou resulteren in hogere transportkosten t.o.v. afgewerkt ijzer, en hoewel enkele voorbeelden hiervan beschikbaar zijn, waren de lokale ijzerproducenten meestal niet erg tevreden met de export van hun ruw materiaal (Childe 1981, 42). Dit zou immers een verschuiving van de arbeid naar een andere locatie betekenen. Daarbij komend lijkt geen ondubbelzinnig bewijs voorhanden voor aanwezigheid van reductieovens nabij de havens.

De goederen werden voornamelijk als ijzerbaren of als ijzerwolven verscheept, vaak opgeslagen in houten tonnen (Pleiner 2000, 281; Stroobants 1978, 90). Pas naar het einde van de 15<sup>e</sup> eeuw werd het ijzer onder de vorm van baren, profielen en platen vervoerd. Deze bewerkingen werden mogelijk gemaakt door het gebruik van hydraulische aandrijving in het raffinage- en voorbereidingsproces (Stroobants 1985, 274).

## 4.2.Brandstof

Zoals vermeld gebruikte de smid voor het verhitten van zijn metaal houtskool en/of steenkool. Een lange tijd werd er vanuit gegaan dat steenkool in de middeleeuwen niet gebruikt werd tijdens het smeden, en dit vanwege de nefaste gevolgen van de zwavel aanwezig in de kool. Dit is echter niet het geval (een simpele voorbehandeling van de kool volstaat om de meeste zwavel eruit te verdrijven) en steenkool komt zeker vanaf de 13<sup>e</sup> eeuw in de geschriften voor (Stroobants 1978, 106-107). Door de aanhoudende kap van de bossen in het Graafschap Vlaanderen was een alternatieve brandstof onontbeerlijk voor de smeden.

Een van deze vroegste geschriften uit 1213 vermeldt voor Haspengouw: “*Terra nigra, carbonum simillima, que fabris et fabrilibus et pauperibus ad ignem faciendum est utilissima*” (Stroobants 1978, 107), waar de schrijver een duidelijk verband legt tussen “zwarte aarde” en brandstof voor de smederijen. Samen met verschillende andere 13<sup>e</sup> eeuwse bronnen kan gesteld worden dat steenkool als huishoudelijke en industriële brandstof werd gebruikt en

naar de grote Vlaamse steden werd uitgevoerd. De benaming van *smedecolen/smeetcolen* in 14<sup>e</sup> eeuwse bronnen moet ook geïnterpreteerd worden als steenkool en niet als houtskool of turf (waarvoor meestal de vanzelfsprekende termen *houtcolen* en *turfcolen* wordt gebruikt). Deze *smeetcolen* werden sinds de 14<sup>e</sup> eeuw uit Engeland geïmporteerd, een reden temeer om te vermoeden dat de term wel degelijk op steenkool slaat (met de houttekorten waarmee Engeland geplaagd werd in het achterhoofd houdend) (Stroobants 1978, 108). Engeland was in de middeleeuwen de meest belangrijke invoerder van steenkool voor onze streken. Deze “*smedecolen [...] uut Inghelant*” (Stroobants 1978, 118) werden onder andere in Northumberland en County Durham ontgonnen waar ze respectievelijk naar Newcastle en Sunderland werden gebracht en konden worden verscheept. Ook in het gebied van de Firth of Forth in Schotland, waar de eerder vermelde Cisterciënzerabdijen van Culross en Newbattle actief waren, bevond zich een belangrijk bekken waarvan de kolen een weg vonden naar de Vlaamse markten (Stroobants 1978, 118; Burton, Kerr 2011, 181). Zuid-Wales en Centraal-Engeland hadden eveneens uitgebreide kolenvelden, maar waren slechts in mindere mate gericht op export (Smith 1997, 301; Stroobants 1978, 118). Ondanks enkele protectionistische maatregelen in de 16<sup>e</sup> eeuw door Hendrik VIII van Engeland, waarna Luik en Charleroi zich in een concurrentiële positie opstelden, bleef het land tot de 18<sup>e</sup> eeuw een van de voornaamste invoerders van steenkolen.

Naast Engeland was ook het gebied rond Condé-sur-l’Escaut, gelegen aan de bovenloop van de Schelde, vanaf de 15<sup>e</sup> eeuw een van de belangrijke bevoorradingscentra van Gent. De steenkoolontginning moet plaatsgevonden hebben vanaf de 14<sup>e</sup> eeuw en werd verhandeld via Doornik naar Gent, met de Schelde als levensader (Stroobants 1978, 115). Deze steenkool komt vanaf de 16<sup>e</sup> eeuw ook voor in de registers van Antwerpen, hetzij sporadisch.

In de 16<sup>e</sup> eeuw werd door verhoogde tolgelden op de steenkool uit Engeland meer en meer kolen uit Henegouwen, het Graafschap Namen en het Prinsbisdom Luik. De kolen werden in deze gebieden ook in de lokale ijzerindustrie gebruikt, zodat de smederijen zich vaak in de nabijheid van deze mijnen bevonden (Stroobants 1978, 116-117).

## Conclusie

De besproken archeologische vondsten afkomstig van drie verschillende sites overspannen een periode van de 10<sup>e</sup> tot de vroege 14<sup>e</sup> eeuw. Deze vondsten maken het mogelijk een beeld te scheppen van de socio-economische context waarin deze sites zich afspelen. Hoewel het slakmateriaal in alle drie de gevallen uit secundaire contexten komt, kunnen ze niettemin een groot inzicht verschaffen in de productie en/of bewerking van ijzer tijdens de middeleeuwen. Hieraan gekoppeld brengen ze inzichten over de lokale productie en import en de sociale context van de site waarin dit materiaal werd aangetroffen.

Los van het feit dat de slakken werden aangetroffen zonder in situ bewaarde structuren van ijzerbewerking of –productie, is het niettemin mogelijk gebleken een aanzienlijke hoeveelheid technische informatie hiervan af te leiden. De slak dient echter in zijn volledigheid te worden bekeken en louter macroscopisch onderzoek is onvoldoende om de verschillende stappen in het productieproces van elkaar te onderscheiden. Het belang van chemische analyse voor het detecteren van de hoofd-, neven- en spoorelementen is gelijkwaardig aan de studie van de morfologische kenmerken ander uitwendige eigenschappen van de ijzerslakken. De relevantie van optische microscopie werd in deze verhandeling niet onderzocht, maar levert eveneens een bijdrage in de categorisatie van het materiaal.

Ondanks de toegepaste archeometallurgische studie bleek het voor vele slakken niet mogelijk om zwart op wit aan te tonen tot welk type ze behoren. De reductieslakken van het type *tap slag* kunnen doorgaands wel op macroscopisch niveau onderscheiden worden vanwege hun kenmerkende vloeivorm en hun homogeniteit.

Moeilijker wordt het om de verschillende smeedlakken en de gesinterde agglomeraten te onderscheiden. Slakken geïnterpreteerd als behorend tot het raffinageproces dienen met behoedzaamheid te worden benaderd. Immers, er bestaat weinig consensus over de morfologische en chemische eigenschappen van dit type slak. Niettemin lijkt het aannemelijk dat de planoconvexe smeedlakken uit de site Gent – Nieuwe Beestenmarkt als dusdanig

geïnterpreteerd kunnen worden. De homogeniteit, de morfologie, de chemische analyse en de context waarin deze slakken werden gevonden gelden als een hoeksteen voor de interpretatie.

De onderverdeling van de smeedslakken in de types SAS, SGD en SFR bleek op macroscopisch niveau ook niet rechtlijnig te zijn. Vaak zijn verschillende combinaties van deze types terug te vinden in een enkele slak. Hier wordt het belang van een expertise op het materiaal duidelijk. Een chemische samenstelling kan desgevallend opheldering bieden, maar in dat geval dient de heterogene smeedslak te worden gehomogeniseerd (d.m.v. verpoedering). Deze laatste procedure werd niet toegepast op het geanalyseerde materiaal, waardoor de resultaten te onbetrouwbaar bleken om het materiaal onderling en met de literatuur te vergelijken. Een foutenmarge van 10% moet in rekening worden gehouden wanneer heterogene slakken in onverpoederde vorm worden geanalyseerd. Dit probleem heeft veel minder betrekking op de homogene slakken en deze kunnen dus in “maagdelijke” staat worden geanalyseerd.

De ijzerwolf aangetroffen op de site Klein Sinaai – Boudelo moet naar alle waarschijnlijkheid worden geïnterpreteerd als een zeer ijzerrijke planoconvexe smeedslak. De inwendige gelaagdheid opgemerkt in de doorsnede doet sterk denken aan een smeedslak en dit is een doorslaggevende factor geweest in de interpretatie.

Een archeometallurgische studie is pas waardevol wanneer de brede archeologische context gekend is. Het is belangrijk om de omgeving van de site, de hydrografie, de ligging t.o.v. grotere steden, mogelijkheden tot ertsontginning, ... te kennen en te bestuderen. Hiervoor dient een interdisciplinaire houding te worden aangenomen. De context waar de ijzerproductie en/of –bewerking plaatsvond is cruciaal om het materiaal beter te begrijpen en toe te kennen aan een bepaalde productiefase.

## Bibliografie

- ANDERSON T. J., AGUSTONI C., DUVAUCHELLE A., SERNEELS V., CASTELLA D., 2003. *Des artisans de la campagne, carrière de meules, forge et voie Gallo-Romaines à Châbles (FR)*, Fribourg: Academic Press Fribourg.
- ASTILL G.G., 1993. *Bordesley A Medieval Industrial Complex and its Landscape : The Metalworking Watermills and Workshops of Bordesley Abbey*, CBA Research Report 40, London: Council for British Archaeology.
- BAYLEY, J., DUNGWORTH D., PAYNTER S., 2001. *Archaeometallurgy (Centre for Archaeology Guidelines)*, English Heritage 2001/1, s.l.: English Heritage Publications.
- Bisdome Gent, Sint-Baafskathedraal*, R.21, Algemeen Rijksarchief Gent
- BLOCKMANS W., HOPPENBROUWERS P., 2009. *Eeuwen Des Onderscheids: Een geschiedenis van middeleeuws Europa*, Amsterdam: Uitgeverij Bert Bakker (Vijfde druk (2002)).
- BOEREN I., ADRIAENSSENS S., DE KEERSMAEKER L., TYS D., VANDEKERKHOVE K., 2009. Een archeologische evaluatie en waardering van houtskoolmeilers in het Zoerselbos (Zoersel, provincie Antwerpen). Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 54. Brussel: Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek.
- BOURGEOIS I., ERVYNCK A., ANNAERT R., BOUDIN M., DEFORCE K., DEGRYSE P., DE WOLF H., HANECA K., HÄNNINEN K., JACOBS M., VANDEN BERGHE I., VAN DER MEER W., VAN NEER W., VAN STRYDONCK M., in druk. Vroegmiddeleeuwse metaalverwerking in het buitengebied: cultureel-archeologisch en natuurwetenschappelijk onderzoek van twee waterputten uit Nijlen (prov. Antwerpen), *Relicta. Archeologie, Monumenten- & Landschapsonderzoek in Vlaanderen* (in druk).
- BURTON J., KERR J., 2011. *The Cistercians in the Middle Ages*, Woodbridge: The Boydell press.

- CHILDS W.R., 1981. England's Iron Trade in the Fifteenth Century, *The Economic History Review, New Series Vol. 34.1*, 25-47.
- CREW P., 1996. Bloom refining and smithing slags and other residues, *Historical Metallurgy Society: Archaeology Datasheet 6*, geraadpleegd op hist-met.org op 18/04/2013.
- DE BELIE A., 1997. *De Boudelo Abdij Archeologisch Onderzocht*, Belsele: De Belie Alfonds.
- DE GROOTE K., MOENS J., CALUWÉ D., COOREMANS B., DEFORCE K., ERVYNCK A., LENTACKER A., VAN NEER W., 2009. Op zoek naar de oudste middeleeuwse bewoning aan de Grote Markt te Aalst (prov. Oost-Vlaanderen). Het onderzoek van afval- en beerkuilen uit de twaalfde tot de veertiende eeuw, *Relicta, Archeologie, Monumenten- en Landschapsonderzoek in Vlaanderen 4*, 135-203.
- DE LAET S.J., VAN DORSELAER A., 1969. Lokale ijzerwinning in westelijk België in de Romeinse tijd. *Mededelingen van de Koninklijke Vlaamse Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België* 31/4, Brussel.
- DE REU J., PLETS G., VERHOEVEN G., DE SMEDT PH., BATS M., CHERRETTÉ B., DE MAEYER W., DECONYNCK J., HERREMANS D., LALOO P., VAN MEIRVENNE M., DE CLERCQ W. 2013. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage, *Journal of Archaeological Science* 40, 1108-1121.
- DERIEUW M., REYNS N., BRUGGEMAN J., 2012. *Archeologische opgraving Melsele (Beveren) – Brielstraat*, Rapporten van het archeologisch onderzoeksbureau All-Archeo bvba 039.
- DE SMEDT O., 1954. *De Engelse Natie te Antwerpen in de 16e eeuw, 1496-1582*, s.l.: De Sikkel.
- DE SMEDT P., VAN MEIRVENNE M., HERREMANS D., DE REU J., SAEY T., MEERSCHMAN E., CROMBÉ PH., DE CLERCQ W., 2013. The 3-D reconstruction of Medieval wetland reclamation through electromagnetic induction survey, *Scientific Reports* 3.
- DE SMEDT P., VAN MEIRVENNE M., SIMPSON D. 2011. Multi-signal EMI and geoarchaeology: evaluating integrated magnetic susceptibility measurements for archaeological prospection, in: M. G. DRAHOR, M. BERGE (eds.), *Archaeological prospections*, Archaeology and Art Publications, 54-57.
- ESPELUND A., 2011. Norway as a bloomery iron producer, in: HOŠEK J., CLEERE H., MIHOK L. (eds.), *The Archaeometallurgy of iron, recent developments in*

- Archaeological and Scientific Research*, Prague: Institute of Archaeology of the ASCR, 87-98.
- GEM S.H., 1912. *An Anglo-Saxon Abbot, Ælfric of Eynsham*, Edinburgh: T. & T. CLARK.
- GULLENTOPS F., WOUTERS L. (eds.), *Delfstoffen in Vlaanderen*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement eWBL, Brussel : Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 158-159.
- HOORNE J., BASTIAENS J., DE MULDER G., DEFORCE K., ERVYNCK A., LENTACKER A., STURTEWAGEN K., 2009. Archeologisch noodonderzoek te Erps-Kwerps-Villershof (Kortenberg, prov. Vlaams-Brabant). Nederzettingssporen uit de ijzertijd, de vroege en de volle middeleeuwen, *Relicta, Archeologie, Monumenten- en Landschapsonderzoek in Vlaanderen 4*, 23-79.
- JOOSTEN C., 2004. *Technology of early historical iron production in the Netherlands*, Amsterdam: Institute for Geoarchaeological and Bioarchaeology studies.
- LALEMAN M.C., 1996. Woord, beeld en materie. Het Sint-Baafsdorp, in Gent, in: De Zutter J., Charles L. & Capiteyn A., *Qui valet ingenio. Liber Amicorum Johan Decavele*, Gent: Stichting Mens en Cultuur, 289-318.
- LANGOHR R., PIETERS M., 1996. De ijzerindustrie in het Zoniënbos, in: GULLENTOPS F., WOUTERS L. (eds.), *Delfstoffen in Vlaanderen*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement eWBL, Brussel : Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 158-159.
- MCDONNELL G., 1995. Bloomery iron smelting slags and other residues, *The Historical Metallurgy Society, Archaeology Datasheet 3*, geraadpleegd op [hist-met.org](http://hist-met.org) op 23/04/2013
- MEYLEMANS E., BASTIAENS J., COUSSERIER K., JANSEN I., 2006. Verkennend onderzoek langs de Witte Nete (provincie Antwerpen): een geomorfologische benadering van archeologisch-landschappelijk diagnostisch onderzoek in de Kempen, *VIOE-Rapporten vol. 2*, 101-126.
- NEF J.U., 1952. Mining and Metallurgy in Medieval Civilisation, in: M. M. POSTMAN, E. MILLER (eds.), *The Cambridge Economic history of Europe Volume II, Trade and Industry in the Middle Ages*, Cambridge: Cambridge University Press, 693-756.
- PLEINER R., 2000. *Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters*, Praha: Archeologický Ústav AV ČR.
- REES W., 1968. *Industry Before the Industrial Revolution: Volume I*, Cardiff: University of Wales press.

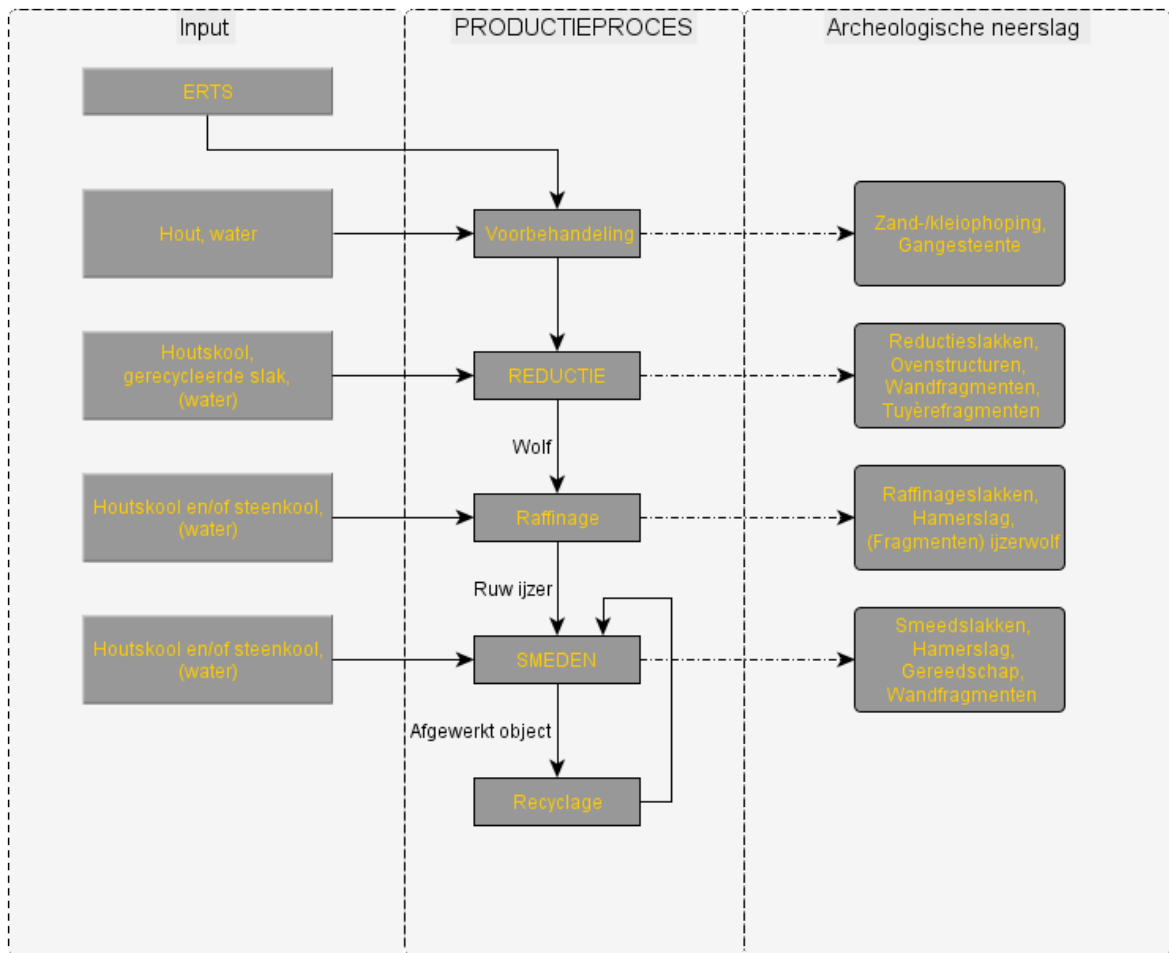


- SERNEELS V., PERRET 2003. Quantification of smithing activities based on the investigation of slag and other material remains. 2003. *Archaeometallurgy in Europe. Proceedings of the International Conference (Milano, 24-26 septembre 2003)*, Vol. 1, Milano: Associazione Italiana di Metallurgia, 469-478.
- SERNEELS V., FEUGÈRE M., 1998. *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*, Monographies instrumentum 4, Montagnac : Mergoïl.
- SERNEELS V., 1993. L'apport des analyses chimiques de minerai, scories et produits associés à l'étude de la sidérurgie ancienne, in: MANGIN M. (ed.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France*, Paris: Ann. Lit. Univ. Besançon 536, 75-81.
- SCHUERMAN E., 1996. De Gallo-Romeinse ijzerindustrie: proces, archeologisch materiaal, ruimtelijke spreiding, In: LODEWIJCKX M. (ed.), *Archaeological and historical aspect of West-European societies: album amicorum André Van Doorsel*, *Acta Archaeologica Lovaniensia Monographiae* 8, Leuven: University Press, 183-193.
- SIM D., RIDGE I., 1998. *Beyond the bloom : bloom refining and iron artifact production in the Roman World*, British Archaeological Reports International Series 725, Oxford: Archaeopress.
- SIM D., RIDGE I., 2002. *Iron for the eagles: the iron industry of Roman Britain*, Stroud : Tempus.
- SMITH C.S. (ed.), 1959. *Vannoccio Biringuccio, De la Pirotechnia*, Minecola : Dover publications.
- SMITH A.H.V., 1997. Provenance of Coals from Roman Sites in England and Wales. *Brittania* 28. 297-324.
- SPEIGHT J. G., 2012. *Chemistry and technology of coal*, New York: CRC Press (derde druk).
- STARLEY D., 1995. Hammerscale, *The Historical Metallurgy Society, Archaeology Datasheet 10*, geraadpleegd op hist-met.org op 18/04/2013.
- STEDELIJK MUSEUM SINT-NIKLAAS, 1982. De abdij van Boudelo: Catalogus van de verzameling bodemvondsten van de verdwenen abdij te Klein-Sinaai, Sint-Niklaas: D'Hondt.
- STROOBANTS A. 1978. *Het ijzerwerk toegepast in de bouwkunst te Gent, Brugge en Antwerpen, vanaf het begin van de 13<sup>e</sup> tot het begin van de 19<sup>e</sup> eeuw. Een vergelijkende studie*, Proefschrift Rijksuniversiteit Gent, Hoger instituut voor Kunstgeschiedenis en Oudheidkunde.
- STROOBANTS A., 1985. Le fer forgé dans l'architecture à Gand, Bruges et Anvers à la fin du Moyen Age, in: CHAPELOT O., BENOIT P., (eds.), *Pierre et Métal dans les*

- bâtiments au Moyen Age*. Paris: Editions de l'Ecole des hautes études en sciences sociales, 273-291.
- TYLECOTE R.F., 1962. *Metallurgy in Archaeology, A Prehistory of Metallurgy in the British Isles*, London: Edward Arnold (Publishers) Ltd..
- TYLECOTE R.F., 1987. *The early History of Metallurgy in Europe*, London: Longman.
- VAN DEN BREMT P., 2005. Enkele aspecten omtrent de cultuurgeschiedenis van de inheemse en ingeburgerde houtige gewassen van Vlaanderen: resultaten van een historisch-botanische verkenning (deel 1: Acer-Castanea), *Relicta, Archeologie, Monumenten- en Landschapsonderzoek in Vlaanderen 1*, 237-254.
- VAN DUIJVENVOORDE R., 2006. Voorhistorische ijzerproductie in Nederland. *Stichting Geologische Activiteiten 39-3*.
- VAN VAERENBERG J., 2012. *Archeologisch vooronderzoek Beveren – Viergemeet*, Intern Rapport Archeologische Dienst Waasland 2012/129.
- VERHAEGHE F., 1981. Medieval moated sites in coastal Flanders, in: ÅBERG F.A., BROWN A.E. (eds.), *Medieval moated sites in North-West Europe*, British Archaeological Reports International Series 121, Oxford: Archaeopress, 127-171.

# Bijlagen

## Bijlage 1: de *chaîne opératoire* van het ijzer, van erts tot metaal



**Bijlage 2: De gewichten van de slakken op elke geanalyseerde site**

	Tap slag (g)	PCB (g)	Non diag (g)	furnace lining (g)	Ijzerwolf (g)	Totaal (g)
<b>site</b>						
Klein Sinaai	-	3379	1731	154	909	6223
Gent	901	1907	-	763	-	3571
Melsele	-	4567	812	854	-	6233
Totaal (g)	901	9853	2552	1771	909	

**Bijlage 3: De chemische elementen onderscheiden door XRF opgelijst met mogelijke verklaringen voor de aanwezigheid ervan (naar Pleiner 2000, 251-252 & Serneels, Feugère 1998, 35).**

Element	Oorsprong
MgO	Erts, brandstof
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ganggesteente, flux en ovenwand
SiO <sub>2</sub>	Ganggesteente, flux en brandstof
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P-rijke ertsen (>1-2 wt%), brandstof
SO <sub>3</sub>	Steenkool, erts (sulfiden)
K <sub>2</sub> O	Brandstof
CaO	Ganggesteente, calciumrijke klei, toevoeging van flux (productie)
TiO <sub>2</sub>	Steenkool
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Erts, reductieslak
MnO	<1% = laag, >3.5% hoog, erts (Mn-rijk limoniet/sideriet), reductieslak
FeO	IJzerbewerking of -productie
CuO	Andere metallurgische bewerkingen, erts
ZnO	Andere metallurgische bewerkingen
SrO	Brandstof, flux

## Bijlage 4: Resultaten van de chemische analyses, mineralogische samenstelling van de ijzerslakken

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>bm2_p_1_1</b>	n.d.	2,86	26,08	3,02	n.d.	1,48	2,74	0,247	n.d.	0,236	63,33	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm2_p_1_2</b>	n.d.	2,41	24,45	1,35	n.d.	1,49	1,93	0,246	n.d.	0,274	67,84	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm2_p_2_1</b>	n.d.	1,70	22,90	4,41	n.d.	0,56	1,86	0,244	0,044	0,111	68,17	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm2_p_2_2</b>	n.d.	2,39	18,29	3,67	n.d.	0,62	1,98	0,256	n.d.	0,122	72,68	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm3_pcb_1_1</b>	n.d.	1,90	8,47	2,40	n.d.	0,82	4,61	0,259	n.d.	0,176	81,37	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm3_pcb_1_2</b>	n.d.	1,42	6,53	2,13	n.d.	0,12	0,86	n.d.	0,070	0,093	88,71	0	n.d.	0,075	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm3_pcb_2_1</b>	0,437	1,87	19,43	13,74	n.d.	0,73	6,57	0,157	n.d.	0,186	56,80	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,086	n.d.
<b>bm3_pcb_2_2</b>	n.d.	1,51	16,12	2,90	n.d.	0,71	2,43	0,162	0,072	n.d.	76,01	0	n.d.	0,090	n.d.	n.d.	0	n.d.
<b>bm3_ws_1_1</b>	n.d.	3,19	20,22	2,83	n.d.	0,72	2,99	0,387	n.d.	0,166	69,51	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm3_ws_1_2</b>	n.d.	3,96	29,44	4,62	n.d.	2,93	4,99	0,450	n.d.	0,202	53,41	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm3_erts-ijzer_1</b>	n.d.	2,46	20,55	0,76	n.d.	0,98	2,23	0,185	n.d.	0,536	0	72,19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,100	n.d.
<b>bm3_erts-ijzer_2_1</b>	n.d.	0,41	0,85	0,25	n.d.	0,04	0,18	0,199	n.d.	0,145	0	97,92	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>bm3_erts-ijzer_2_2</b>	n.d.	0,48	0,42	0,22	n.d.	0,04	0,47	n.d.	n.d.	n.d.	0	98,12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,262	n.d.

Tabel met resultaten van de chemische analyse van de site **Gent - Nieuwe Beestenmarkt**. N.d.: not detected.

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ksb25_sgd_1	n.d.	11,50	19,23	0,46	n.d.	2,40	1,50	0,753	0,071	0,119	63,97	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ksb25_sgd_2	n.d.	11,24	18,80	n.d.	2,77	2,38	1,49	0,747	n.d.	0,126	62,45	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ksb25_nd_1_1	n.d.	18,19	40,92	n.d.	n.d.	8,22	2,33	1,515	n.d.	0,240	28,21	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,181	0,203
ksb25_nd_1_2	2,495	23,36	44,18	0,36	n.d.	8,48	1,50	1,455	0,106	0,094	17,80	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,167	n.d.
ksb25_pcb_1_1	n.d.	3,86	5,73	1,22	n.d.	1,08	1,52	1,204	0,073	0,252	84,69	0	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,199	n.d.
ksb25_pcb_1_2	n.d.	4,28	7,54	2,06	n.d.	0,14	2,60	0,511	n.d.	0,161	82,15	0	0,554	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ksb4_sas_1_1	n.d.	27,35	56,04	1,34	n.d.	5,92	1,09	2,652	0,107	n.d.	5,37	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,133	n.d.
ksb4_sas_1_2	1,531	5,17	11,83	0,69	n.d.	1,59	2,70	0,596	n.d.	0,186	75,02	0	0,479	n.d.	n.d.	n.d.	0,200	n.d.
ksb26_sk_1	n.d.	17,72	48,99	1,31	11,87	7,78	2,91	2,212	n.d.	n.d.	6,74	0	0,064	0,192	n.d.	0,103	0,108	n.d.
ksb_x_erts_1_1	n.d.	2,63	11,98	6,30	4,47	0,67	5,63	0,241	n.d.	3,924	0	63,71	n.d.	n.d.	0,264	n.d.	0,184	n.d.
ksb_x_erts_1_2	n.d.	1,56	10,38	9,16	n.d.	0,52	4,61	0,206	n.d.	4,721	0	67,92	n.d.	n.d.	0,250	n.d.	n.d.	0,671

Tabel met resultaten van de chemische analyse op de monsters van site **Klein-Sinaai Boudelo**. N.d.: not detected.

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
mls_54_ws_1_1	n.d.	2,86	58,11	n.d.	n.d.	7,68	6,30	0,258	n.d.	0,522	23,99	0	0,114	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,169
mls_54_ws_1_2	n.d.	2,98	62,46	n.d.	n.d.	6,20	2,75	0,282	n.d.	0,230	24,77	0	0,076	0,154	n.d.	n.d.	0,107	n.d.
recent_pcb_1_1	n.d.	14,91	57,24	n.d.	n.d.	2,42	6,76	2,444	n.d.	0,111	15,39	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,423	0,289

Tabel met resultaten van de chemische analyse op de monsters van de site **Melsele – Brielstraat**, met ter vergelijking de waarden van de analyse op een recente smeedslak (= ijzerlegering zonder verontreiniging van slak en met steenkool als brandstof). N.d.: not detected.

### Bijlage 5: Opgravingsplan van Melsele – Brielstraat (uit Derieuw et al. 2012, 17)

