

Het slakmateriaal van De Motketel te Wehl (gemeente Doetinchem)

Analyse, rapportage en redactie door dr. P. T. A. de Rijk
Archeometrisch onderzoek uitgevoerd door J. van der Laan en H. Kars

Rapport EARTH 2013-16
Opdrachtgever BAAC bv, projectnr. A-10.0262
© 2013 www.earth-arch.eu

Samenvatting

In opdracht van BAAC bv is het slakmateriaal van De Motketel te Wehl gedetermineerd. Uit het onderzoek is gebleken dat:

- veruit de meeste slak als productieslak gedetermineerd kan worden dat bij de winning van ijzer in een oven, waarin slak zijdelings werd afgetapt, is ontstaan;
- de oven of ovens in het westelijke deel van het opgegraven terrein stonden en vermoedelijk een hoogte van 0,8-1,0 m en een binnendiameter van ca. 0,35 m hadden;
- als erts en brandstof klapperstenen en houtskool werden gebruikt;
- de oventemperatuur ca. 1200 °C was en het rendement ongeveer 34%; op basis van de hoeveelheid gevonden productieslak zal ca. 20 kg ijzer zijn geproduceerd;
- het ijzer vermoedelijk voor eigen gebruik gewonnen werd; de smid de gewonnen wolf, na grof te zijn bewerkt (scheiden van ijzerarme en ijzerrijke delen, eventueel klieven), in de smeedhaard tot objecten smeedde;
- de smidse zich waarschijnlijk meer richting het midden van het opgegraven terrein bevond;
- de slak na opgave van houten structuren in paalgaten terecht is gekomen en gebruikt is om kuilen en dergelijke mee op te vullen.

I Inleiding

Bij archeologische opgravingen in plangebied Heideslag te Wehl, deelgebied Motketel, zijn drie vindplaatsen onderzocht. Twee daarvan bevatten bewoningssporen uit de IJzertijd, de derde kan als nederzetting uit de vroege en volle middeleeuwen worden gedefinieerd. Gevonden werden onder andere paalkuilen van gebouwen en spiekers alsook kuilen met metaalslak. Deze vondstcategorie komt qua hoeveelheid op de tweede plaats na het aardewerk.¹

In het Programma van Eisen dat voor deze vindplaats is opgesteld, zijn ten aanzien van de slak (indirect) enkele vragen geformuleerd.² Zij hebben betrekking op de soort werkzaamheden die in Wehl zijn uitgevoerd, de economie en het gebruik van het landschap. Zij zullen in hoofdstuk 6 worden beantwoord.

2 Methodiek en conservering

Het slakmateriaal is met de hand en per spoor en vulling verzameld. De slak is macroscopisch onderzocht waarbij gelet is op de vorm, grootte, insluitingen en afdrukken, kleur en textuur. Ook zijn het gewicht en magnetisme van de slak vastgesteld.³ Met behulp van deze kenmerken kan in veel gevallen worden bepaald bij welk proces de slak ontstaan is en kan informatie worden gewonnen over de vorm en het type haard of oven.

¹ Kimenai 2011.

² Pronk 2010.

³ Hiervoor is een digitale weegschaal met een bereik tot 3 kg en een nauwkeurigheid van 0,1 g gebruikt, voor stukken zwaarder dan 3 kg is een mechanische weegschaal gebruikt met een bereik van 12 kg en een nauwkeurigheid van 100 g. Voor de bepaling van het magnetisme werd een blokmagneet gebruikt en de magnetische aantrekking relatief afgeschat. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen licht magnetisch (zwakke aantrekking), magnetisch (magneet blijft aan de slak hangen) en sterk magnetisch (slak kan met de magneet worden opgetild).

In een volgend stadium zijn 15 slakfragmenten op chemische samenstelling onderzocht.⁴ Zij zijn zo uitgezocht dat zij een representatieve doorsnede vormen van de aangetroffen slaktypen. Met behulp van de chemische samenstelling is het eventueel mogelijk te achterhalen wat voor erts en brandstof gebruikt zijn, waar deze vandaan kwamen en in welke verhouding zij gebruikt zijn. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld handelswegen gereconstrueerd worden en kan de hoeveelheid geproduceerd ijzer worden berekend.

De slak is in het algemeen matig tot goed bewaard gebleven. Ongeveer de helft van het aantal slakfragmenten toont roestige plekken en ongeveer een kwart is met een leemachtig, bruin tot lichtgeel laagje bedekt dat moeilijk te verwijderen is. Het betreft waarschijnlijk bodemmateriaal dat met het ijzer in de slak gereageerd heeft. Roestige en niet-roestige slak is naast elkaar over de onderzoekslocatie verspreid gevonden.

3 Slakbeschrijving

De gevonden slak vertegenwoordigt meerdere fases binnen de zogenaamde *chaîne opératoire* van ijzer. Hierin worden de verschillende bewerkingen beschreven die nodig zijn om van ijzererts tot een gesmeed ijzeren voorwerp te komen (tab. 1). Deze fases betreffen het produceren van ijzer uit ijzererts in een oven, de verdere bewerking van het in de oven verkregen ijzer of wolf in een oven of smeedhaard (het zogenaamde herverhitten) en het smeden van de van slak gereinigde en gecompriëerde wolf tot gebruiksvoorwerp in een smeedhaard.

actie	grondstof	object	afvalproduct	eindproduct
produceren	erts	oven	productieslak	wolf
herverhitten	wolf	oven/smeedhaard	herverhittingslak	gesmede wolf
smeden	gesmede wolf	smeedhaard	smeedslak	ijzeren voorwerp

Tab. 1: vereenvoudigde weergave van de *chaîne opératoire* van ijzer. Naast de in de tabel genoemde grondstof werd in ieder stadium ook houtskool als brandstof en leem voor de bouw van oven en haard benodigd.

Tijdens de opgravingen zijn in totaal 981 stukken slak en slakachtig materiaal met een gewicht van meer dan 115 kg geborgen. Zij kunnen worden onderverdeeld in productieslak, smeedafval, ijzererts en mogelijk ook wolf. Binnen de categorieën productieslak en smeedafval kunnen weer elk drie typen worden onderscheiden, te weten de tapslak, ovenslak en ovenwand, alsmede de ijzerrijke smeedslak, de silicaatrijke smeedslak en haardwand (tab. 2). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de verschillen tussen de typen niet altijd duidelijk zijn. Tapslak is in de regel goed herkenbaar, net als ovenslak en smeedslak. Echter, het verschil tussen deze categorieën wordt glijdend als in de oven of smeedhaard slak met vloeistrukturen dan wel een planoconvexe vorm ontstaat. Bovendien kunnen in een haard meerdere processen zijn uitgevoerd, zoals het smeden van wolf en het aansluitend smeden van de van slak gereinigde wolf tot object. De slak die hierbij ontstaat heeft zowel kenmerken van productieslak als van smeedslak. Ook de verschillen tussen ovenwand en haardwand zijn vaak diffuus.

⁴ Dit is gedaan door BSc. J. van der Laan. Daartoe werden monsters enerzijds doorgezaagd en geanalyseerd met de *hand-held* XRF en anderzijds gemalen, waarna glasparsels werden vervaardigd die met de *wavelength-dispersive* XRF (WD-XRF) in de laboratoriumopstelling geanalyseerd zijn. Zie bijlage 1.

type	n	G (kg)	n (%)	G (%)
erts	11	0,2	1,1	0,2
tapslak	638	97,0	65,0	83,2
ovenslak	145	11,1	14,8	9,5
ovenwand	72	3,8	7,3	3,3
wolf	1	0,0	0,1	0,0
ijzerrijke smeedslak	78	3,9	8,0	3,3
silicaatrijke smeedslak	7	0,0	0,7	0,0
haardwand	29	0,6	3,0	0,5
<i>totaal</i>	<i>981</i>	<i>116,6</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>

Tab. 2: aantal (n) en gewicht (G) van het gevonden slakmateriaal per categorie.

Binnen de slakcategorieën neemt tapslak naar aantal en gewicht met afstand de eerste plaats in. Het procentuele verschil tussen aantal en gewicht van de stukken wordt ondermeer veroorzaakt door verschillen in het soortelijk gewicht, waarbij dat van de tapslak in de regel iets hoger is als dat van de ijzerrijke smeedslak.⁵ Verder is het formaat van de slakfragmenten van productieslak, met name van tapslak, en daarmee het gewicht, in veel gevallen een stuk groter dan dat van smeedslak.

3.1 Erts

Het uitgangsmateriaal bij de ijzerproductie is ijzererts. In Nederland zijn twee typen erts bekend: moerasijzererts en klapperstenen. Mineralogisch gaat het in beide gevallen om ijzerhydroxiden.⁶ Bij de eerste slaat door humuszuren opgelost ijzer neer in zuurstofrijk water en rijkt in stilstaand tot zwakstromend water aan. Op deze manier kunnen zich over de jaren dikke platen vormen. Bij klapperstenen is het ijzer in concentrische lagen rond een kern van bijvoorbeeld klei gevormd. Vaak komt deze kern door krimp los van de ijzerrijke huid eromheen en maakt bijgevolg een rammelend geluid als er mee geschud wordt. Hoe klapperstenen ontstaan, is niet geheel duidelijk. Zij kunnen enerzijds het gevolg zijn van de gedeeltelijke omvorming van ijzercarbonaat (hiervoor spreekt dat veel klapperstenen een kern van ijzercarbonaat hebben), anderzijds kunnen zij door het neerslaan van ijzer, dat in het grondwater is opgelost, rond een kleiige kern zijn ontstaan.⁷ De grootste concentraties klappersteen worden als ertsbanden in de bovenste lagen van stuwwallen op de Veluwe en in het Montferland gevonden. Daarnaast komen zij in Zuid-Limburg voor en in pleistocene en holocene grind- en rivierafzettingen van Rijn en Maas. Hun diameter varieert van minder dan een centimeter tot enkele decimeters.⁸

In Wehl is hoofdzakelijk erts in de vorm van klapperstenen gevonden. Daarnaast is ook een klein stukje moerasijzererts aangetroffen:

⁵ Gemiddeld ligt het soortelijk gewicht van tapslak bij 3,5 g/cm³, dat van ijzerrijke smeedslak bij 2,9 g/cm³, dat van silicaatrijke smeedslak bij 1,9 g/cm³ en dat van oven- en haardwand bij ongeveer 2,0 g/cm³.

⁶ Te weten goethiet (α -FeO(OH)), lepidocrokiët (γ -FeO(OH)) en limoniet (Fe₂O₃·nH₂O). Joosten 2004, 68, 97. De Rijk 2007, 151-152.

⁷ Van Duijvenvoorde 2006, 86-87.

⁸ Laban et al. 1988, 4.

- 1 De stukken klappersteen tonen diverse kleuren variërend van oker tot bruin en zwart. Een gelaagde concentrische structuur is in de meeste gevallen duidelijk herkenbaar (afb. 1a). De afmetingen van de stukken bedragen gemiddeld ca. 3,5 x 2,5 x 1,5 cm. Twee fragmenten zijn (partieel) magnetisch, wat op verhitting kan wijzen.⁹ Eén hiervan werd samen met een grote hoeveelheid slak in een kuil gevonden.¹⁰ Het is goed mogelijk dat dit stuk ooit voor de ijzerproductie bedoeld was maar naast de oven terecht is gekomen en later met de slak in een kuil is gestort. Het magnetisme kan enerzijds verklaard worden door het roosten, dat wil zeggen het verwarmen van het erts bij relatief lage temperaturen (tot ca. 800 °C, waarbij kristalwater en organisch materiaal uit het erts worden verdreven en het materiaal bros wordt en zo eenvoudiger in kleinere stukken kan worden geslagen). Anderzijds is het mogelijk dat het erts samen met nog gloeiende slak en houtskool in een kuil is gestort en door de warmte magnetisch is geworden.
- 2 Het aangetroffen stukje moerasijzererts is onregelmatig gevormd, meet ca. 2,5 x 2,5 x 2,0 cm en is opgebouwd uit grijze tot donkergrijze kubische kristallen die met roest en fijn sediment verkit zijn (afb. 1b). Het is niet duidelijk of dit erts verzameld is om ingezet te worden bij de ijzerproductie. Hoewel het formaat hiervoor spreekt, maakt het feit dat slechts één fragment is gevonden deze aanname minder waarschijnlijk. Vermoedelijk komt het moerasijzererts uit een nabijgelegen beekdal en zal hoogstens aanvullend op de klapperstenen als erts zijn ingezet.



Afb. 1a: klappersteen V599. De concentrische gelaagdheid is duidelijk zichtbaar. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 1b: moerasijzererts V363. De schaalverdeling is in cm.

De klapperstenen zijn in de heuvels van het Montferland in kuilen gewonnen. Van Heek beschrijft hun voorkomen als volgt:¹¹ *“Het zijn zachtschalige ijzerhoudende stenen ter grote van een ei en nog groter. Ze zijn dikwijls aaneengeklonterd en komen voor in uitgestrekte, naar het noorden afhellende leemlagen, die als langgerekte geelbruine banen aan de oppervlakte komen. De dikte ervan kan wellicht variëren van een halve meter tot ongeveer twee meter.”*

⁹ Bij verhitting worden ijzerhydroxiden en -carbonaten omgevormd tot het ijzeroxide hematiet ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dat in een bepaalde vorm magnetisch kan zijn ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$; maghemiet). Deze vorm is boven 300-400 °C instabiel. Bij verdere reductie ontstaat magnetiet ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) dat eveneens magnetisch is.

¹⁰ V204. Het fragment meet ca. 4,0 x 3,5 x 2,5 cm.

¹¹ Van Heek 1952, 231.

De kuilen waarin de klapperstenen gewonnen zijn, hebben een diameter van ca. 80 m (?) en liggen in parallelle rijen en evenwijdig aan de hoogtelijnen, met name in het noordelijke deel van de stuwwal in het Bergherbos.¹² De winplaatsen liggen hemelsbreed ongeveer 3 km ten zuiden van de onderzoekslocatie.

Twee stukken klappersteen zijn chemisch geanalyseerd (zowel met de WD-XRF als met de *hand-held* XRF). Ter vergelijking is de samenstelling van een eerder geanalyseerde klappersteen uit de omgeving van Wehl in de tabel opgenomen (tab. 3).¹³

monster	V204-28	V599-10	KIWI	V204-28	V599-10
SiO ₂	19,4	7,7	11,0	19,4	10,3
TiO ₂	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1
Al ₂ O ₃	3,5	1,8	2,6	5,8	3,3
Fe ₂ O ₃	60,3	76,1	78,9	76,3	81,4
MnO	2,1	2,1	3,7	3,0	2,4
MgO	0,3	0,2	0,2	-	-
CaO	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1
Na ₂ O	0,2	0,1	<0,1	-	-
K ₂ O	0,7	0,3	0,5	0,7	0,4
P ₂ O ₅	0,3	0,5	1,4	0,5	0,4
<i>totaal</i>	<i>87,3</i>	<i>89,0</i>	<i>98,7</i>	<i>106,1</i>	<i>98,4</i>
LOI	2,1	11,5	13,6	-	-

Tab. 3: chemische samenstelling van klapperstenen in %, gemeten met de WD-XRF in de laboratoriumopstelling (kolommen links). Het totaal is de som van de oxides na verhitting tot 1000 °C met al het ijzer als Fe₂O₃. LOI: *loss on ignition* bij 1000 °C. De waarden in de twee kolommen rechts zijn gemeten met de *hand-held* XRF en geconverteerd naar oxides.

3.2 Tapslak

Dit type slak ontstaat wanneer ijzererts samen met houtskool bij relatief geringe temperaturen in een oven worden verhit. Tijdens dit proces reduceert een deel van het ijzeroxide in het erts tot metallisch ijzer, het andere deel reageert met het niet-ijzerhoudende deel van het erts en vormt slak. In Wehl bleef een deel van deze slak in de oven achter en vormde de zogenaamde ovenslak (zie 3.3), de rest vloeide uit de oven en vormde tapslak. Dit type slak heeft een karakteristieke vorm bestaande uit vingervormige vloeistrukturen die horizontaal over elkaar zijn gevloeid. Het lijkt erop dat in de aanloop naar de ontwikkeling van de hoogoven vanaf het einde van de 12^e eeuw de vloeistrukturen breder worden en de slak een meer vesiculaire structuur

¹² Van Heek 1952, 230, 233. De omvang van de kuilen wordt hierin beschreven als groter dan die van de Veluwe en naar een bericht van J. Schneider uit 1846 als zijnde "honderd schreden in omvang en met een wal omgeven". De kuilen zijn enkele jaren geleden door Staatsbosbeheer gekarteerd maar informatie hierover wordt om redenen van schatgraverij niet verstrekt.

¹³ Joosten 2004, 106 tab. 33. Dit fragment is in de omgeving van Wehl aan het oppervlak gevonden. Vanwege de verdunningsfactor van de monsters V204-28 en V599-10 is de analysesom een stuk lager dan 100%.

krijgt.¹⁴ Deze ontwikkeling werd ingegeven door de exponentiële toename in de vraag naar ijzer.¹⁵

De gevonden tapslak bestaat uit veelal grote en vlakke fragmenten die tot grotere platen kunnen worden samengevoegd. Het grootste slakfragment weegt ruim 7 kg, is 25 cm breed en 7 cm dik (afb. 2a). De oorspronkelijke lengte is niet meer te bepalen maar bedraagt bij één slak minstens 44 cm. De slak vloeide in een vlak-komvormige verdieping voor de oven, waarbij vaak meerdere slaklagen van horizontaal gevloeide (vingervormige) slak te herkennen zijn.¹⁶ De onderzijde kan met een dunne laag lichtgrijs gebrande leem bedekt zijn, danwel een pokdalig uiterlijk hebben; het gevolg van plotseling verdampend water uit de bodem door hete slak. Daarnaast kunnen kleine stukjes gebrande leem aan de slak hechten. Deze kunnen van de oven stammen of bij het repareren van de oven als leemklompjes op de grond zijn gevallen en door de hitte van de slak zijn gebrand.



Afb. 2a: tapslak V204. Links het 7 kg fragment, rechts een slak van bijna 5 kg en een restlengte van 44 cm. Aan de bovenkant is leem van de ovenwand zichtbaar. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 2b: tapslak V204. De slak is in meerdere lagen over elkaar uit de oven gevloeid. De ovenwand is rechtsachter te zien. De schaalverdeling is in cm.

Behalve vlakke tot lichtconcave slakbodems komen ook meer V-vormige exemplaren voor. Zij wijzen op een soort van kanaal dat vermoedelijk met een spade in de (losse) bodem is getrokken om de slak in de gewenste richting te leiden. De breedte van de tapslak varieert tussen 3 en 25 cm zonder dat een duidelijke concentratie is waar te nemen. De dikte van de slak kon vaker worden gemeten en loopt uiteen tussen ca. 1 en 14 cm met een duidelijke concentratie bij 3 cm. De slak is het dikst bij de oven en wordt in de regel dunner en smaller naarmate hij verder van de oven is gestold. Interessant is dat nagenoeg alle zware stukken slak (>1 kg) in slechts twee kuilen in het westelijke deel van het opgegraven terrein zijn gevonden. Met behulp van de slak uit één van deze kuilen (S7054) kunnen minstens vijf ovengangen worden afgeleid, dat wil zeggen, er is minstens vijf keer ijzer geproduceerd. De slak kan afkomstig zijn uit vijf verschillende ovens, meer waarschijnlijk is echter dat

¹⁴ De ontwikkeling van de hoogovens vond geleidelijk en in meerdere delen van Europa plaats. De vroegste hoogovens (ovens waarin gietijzer werd geproduceerd) zijn bekend uit Zweden en Duitsland. De veranderende morfologie van tapslak is afgeleid uit eigen onderzoek van meerdere productieplaatsen in deze periode.

¹⁵ Pleiner 1996, 254.

¹⁶ In V014 konden drie slaklagen worden geteld met een gemiddelde dikte van 23 mm. In V345 konden vijf slaklagen worden onderscheiden. Ongeveer 7% van de tapslak toont een gelaagde opbouw.

het hier slechts één oven betreft die meermaals is gebruikt. Na iedere productieronde werd de slak voor de oven verwijderd en de wolf uit de oven gehaald. De oven werd dan gerepareerd voor de volgende productiegang. Mogelijk werd door het verwijderen van de slak het opvangbekken, danwel het slakkanaal voor de oven steeds dieper. De slak die uit de oven vloeide, kwam dientengevolge van steeds hoger. Dit is zichtbaar in de slak. De tapslak vloeit in het begin nagenoeg horizontaal uit de oven, bij de latere productie daarentegen ontstaat slak met een soort van druipkaarsstructuur langs de ovenwand (afb. 2b).

Afdrukken en insluitingen van houtskool zijn in resp. 3 en 6% van met name de grote stukken tapslak aanwezig. Zij wijzen op het gebruik van houtskool als brandstof bij de ijzerproductie. Houtskool werd pas vanaf het begin van de 18^e eeuw geleidelijk vervangen door cokes.¹⁷

Ongeveer ieder tiende stuk tapslak toont met het blote oog zichtbare fayalietkristallen op het breukvlak. Fayaliet is een ijzersilicaat ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) en de belangrijkste bouwsteen van ijzerrijke slak. De grootte van de kristallen is omgekeerd evenredig aan de afkoelingsnelheid; hoe sneller de slak stolt, hoe kleiner de kristallen zijn. Het feit dat de kristallen met het blote oog zichtbaar zijn, wijst op een langzame afkoeling. De oorzaak hiervoor moet waarschijnlijk gezocht worden in de grote hoeveelheid slak die bij de productie ontstaat, waardoor de warmte langer vastgehouden wordt. Dit zou betekenen dat slak die ver van de oven verwijderd stolt, kleinere kristallen zal tonen dan slak die dicht bij de oven afkoelt, eenvoudigweg omdat daar meer slak aanwezig is. De verhouding slakdikte : grote kristallen geeft hierover echter geen uitsluitsel.

Wordt naar de structuur van de slak gekeken, dan tonen meer dan driekwart van de stukken minder dan 15% gasblaasjes, de overige stukken hebben tot ca. 40% gasblaasjes. Zij zijn het gevolg van vluchtige stoffen, zoals waterdamp en kooldioxide, die door de gesmolten slak zijn opgenomen. Bij afnemende temperatuur en druk neemt de hoeveelheid vluchtige stoffen af die opgenomen kan worden. Er ontstaan dan kleine blaasjes die groter worden naarmate druk en temperatuur dalen. De slak stolt het eerst aan het oppervlak waardoor de blaasjes daar immobiel worden.¹⁸ Hoe meer slak ontstaat en hoe langzamer deze afkoelt (dus hoe langer de slakkern de temperatuur vasthoudt), hoe duidelijker het verloop van kleine (kern) naar grote blaasjes (rand) te zien is. De verschillend grote gasblaasjes in de gevonden slak zijn een aanwijzing voor een relatief snelle afkoeling van het slakoppervlak en een slakkern die langer viskeus (vloeibaar tot stroperig) bleef, waardoor de gasblaasjes nabij het reeds afgekoelde slakoppervlak door opstijgend gas uit de kern konden groeien.

Om slak uit de oven te kunnen tappen, moet deze laagviskeus zijn, dat wil zeggen een zo laag mogelijk smeltpunt hebben. De chemische samenstelling van tapslak geeft daarom theoretisch de ideale verhouding tussen de slakvormende componenten erts, brandstof en ovenwand weer.¹⁹ Tapslak zal bijgevolg in de regel niet magnetisch zijn aangezien dit een overschot aan ijzer in de smelt zou betekenen. Driekwart van de tapslak in Wehl voldoet aan deze regel. Het overige kwart is partieel lichtmagnetisch.

¹⁷ Cleere 1995, 296.

¹⁸ Obata & Mizuta 1994, 261 ff.

¹⁹ Een vloeimiddel zoals kalk werd bij het directe productieproces (zoals in Wehl) in de regel niet toegevoegd. Een uitzondering lijkt een oven in Ooster Dalfsen te zijn waar mogelijk mosselen werden gebruikt (Joosten & Van Nie 1996, 88).

monster	V611-01 (s)	V612-02 (s)	V204-18 (s)	V204-12 (m)	V204-13 (c)
SiO ₂	18,3	20,0	17,9	22,0	24,7
TiO ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Al ₂ O ₃	4,6	4,8	3,9	4,6	5,5
FeO	49,6	48,9	37,2	46,4	43,7
Fe ₂ O ₃	55,1	54,4	41,3	51,6	48,6
MnO	4,7	3,8	3,8	4,9	5,1
MgO	0,4	0,6	0,7	0,8	0,7
CaO	0,6	0,8	2,3	1,3	0,9
Na ₂ O	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
K ₂ O	0,6	0,9	1,1	1,0	1,4
P ₂ O ₅	1,0	0,7	0,7	0,7	0,8
<i>totaal</i>	<i>85,7</i>	<i>86,3</i>	<i>72,1</i>	<i>87,4</i>	<i>88,1</i>
LOI	-6,2	-2,4	-5,0	-4,5	-5,1

Tab. 4: chemische samenstelling van tapslak in %, gemeten met de WD-XRF in de laboratoriumopstelling. Het totaal is de som van de oxides na verhitting tot 1000 °C met al het ijzer als Fe₂O₃. Omdat het ijzer in de slak hoofdzakelijk als FeO aanwezig is, is deze waarde uit Fe₂O₃ berekend (cursief).

LOI: *loss on ignition* bij 1000 °C. (s): <5% gasblaasjes. (m): 10-15% gasblaasjes. (c): 20-30% gasblaasjes.

Van de tapslak zijn acht fragmenten chemisch geanalyseerd. De slak komt hoofdzakelijk uit kuil S7054 in het oostelijke deel van het opgegraven terrein en uit waterput S16059 in het midden van het terrein. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen slak met een verschillende vesiculaire structuur (tab. 4-5). Chemisch zijn evenwel geen verschillen aantoonbaar.

monster	V611-01 (s)	V612-02 (s)	V204-18 (s)	V204-12 (m)	V204-14 (m)	V204-13 (c)	V204-16 (c)	V204-22 (c)
SiO ₂	26,3	27,4	31,0	29,1	29,7	32,1	29,8	31,3
TiO ₂	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
Al ₂ O ₃	11,1	11,0	11,7	11,1	10,3	13,1	12,1	12,7
FeO	63,0	62,1	54,9	57,8	62,0	52,8	56,8	56,1
MnO	6,5	5,2	6,2	7,0	4,7	6,7	5,7	7,2
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	0,9	0,9	4,0	2,0	2,3	1,3	1,5	2,1
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	1,1	1,0	1,9	1,6	1,4	1,9	1,5	2,0
P ₂ O ₅	2,0	1,2	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,6
<i>totaal</i>	<i>111,2</i>	<i>109,1</i>	<i>111,5</i>	<i>110,2</i>	<i>111,8</i>	<i>109,7</i>	<i>109,1</i>	<i>113,3</i>

Tab. 5: chemische samenstelling van tapslak in %, gemeten met de *hand-held* XRF en geconverteerd naar oxides.

(s): <5% gasblaasjes. (m): 10-15% gasblaasjes. (c): 20-30% gasblaasjes.

3.3 Ovenslak

De slak die in de oven achterblijft, vult in de regel de hele ovenbodem op. Het is een combinatie van ijzerrijke slak, houtskool, partieel gereduceerd erts en ovenwand in wisselende samenstelling. De wolf ontstaat ingebed in de bovenzijde van deze massa, in de buurt van de luchtinlaat. Aan het eind van het productieproces worden wolf en ovenslak uit de oven gebroken zodat de laatste nogmaals gebruikt kan worden.²⁰ Aangenomen kan worden dat de slak bij het leeghalen van de oven in kleinere stukken breekt en alleen in uitzonderlijke gevallen, of bij het achterblijven van de slak in de oven, archeologisch in zijn geheel geborgen kan worden.²¹ In Wehl is niets van de oven(s) overgebleven en de ovenslak is in vele kleine stukken gebroken. Een scala aan slaktypen is als ovenslak geïnterpreteerd. Aan het ene einde bestaat deze uit onregelmatig gevormde, roestige en houtskoolrijke stukken van ongeveer 8 x 6 x 4 cm (afb. 3a) en aan het andere einde uit massieve en onregelmatig gevormde ijzerrijke slak waaraan nog delen van de ovenwand of ovenbodem kunnen hechten (afb. 3b). Daartussen zitten voornamelijk grote brokken slak met veel houtskoolinsluitingen en een soort van open structuur als slak tussen houtskool door is gedruppeld. In het algemeen is driekwart van de ovenslak niet magnetisch. Dit is vergelijkbaar met de tapslak, met als verschil dat bij de ovenslak vooral de grote stukken partieel lichtmagnetisch zijn.

Insluitingen van houtskool kunnen in 45% van de stukken worden aangetoond en afdrucken hiervan in ongeveer elk vierde fragment. Anders dan bij de tapslak kunnen in de ovenslak niet of nauwelijks fayalietkristallen worden waargenomen. Ook bevatten zij beduidend meer gasblaasjes dan tapslak; bij nagenoeg alle fragmenten bedroeg de hoeveelheid meer dan 20%. Deze grote hoeveelheid wijst op een hoog aandeel vluchtige stoffen, welke waarschijnlijk terug te voeren is op de verbranding van houtskool. Hierbij ontstaan koolmonoxide en

²⁰ Een door en door droge ovenwand heeft een positief effect op het productieproces.

²¹ Op slakhopen in het Montferland schijnt ooit wel complete ovenslak gevonden te zijn. Deze slak wordt beschreven als "grote kegelvormige brosse klompen die niet gevloeid hebben". Sommige stukken hadden een "kelkvormige holte" (Tinneveld 1953, 152).

kooldioxide. Het sterk verschillende volume van de blaasjes wijst, net als bij de tapslak, op een relatief snelle afkoeling van het slakoppervlak en een langer viskeus blijvende slakkern.



Afb. 3a: houtskoolrijke ovenslak V204. Het fragment is sterk roestig. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 3b: bovenzijde van ovenslak V689. Aan de rechterzijde is vaag nog leem van de ovenwand te herkennen. De schaalverdeling is in cm.

De vorm van de oven is aan de hand van de ovenwand- en bodemdelen die aan de slak hechten summier te reconstrueren. Hij was vermoedelijk rond met een diameter van ca. 35 cm. De wand ging aan de onderzijde hoekig in de bodem over (afb. 4a). De bodem zelf was licht concaaf en bekleed met zandige leem (afb. 4b).



Afb. 4a: onderzijde van ovenslak V728. De slak is deels tussen houtskool door gedruppeld. Langs de bovenrand is oranje gebrande leem van de ovenwand te zien. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 4b: onderzijde van ovenslak V204. Hieraan hecht lichtgrijs gereduceerd zandige leem. De schaalverdeling is in cm.

Twee stukken ovenslak zijn chemisch geanalyseerd, met name om de invloed van het houtskool op de slaksamenstelling na te kunnen gaan (tab. 6). Deze zouden, vergeleken met tapslak, hogere waarden voor met

name calcium (CaO) en in mindere mate kalium (K₂O) en magnesium (MgO) moeten tonen.²² Dit is in de monsters niet het geval.

monster	V204-33	V204-30	V204-33
SiO ₂	22,3	23,9	29,3
TiO ₂	0,2	0,2	0,3
Al ₂ O ₃	5,0	10,3	12,1
FeO	46,2	54,5	54,2
Fe ₂ O ₃	51,4	60,6	60,2
MnO	4,2	5,7	5,7
MgO	0,6	-	-
CaO	0,9	1,0	1,4
Na ₂ O	0,2	-	-
K ₂ O	0,7	1,1	2,2
P ₂ O ₅	0,7	0,9	1,8
<i>totaal</i>	<i>86,1</i>	<i>97,6</i>	<i>106,9</i>
LOI	40,3	-	-

Tab. 6: chemische samenstelling van ovenslak in %, gemeten met de WD-XRF in de laboratoriumopstelling (kolom links) en met de *hand-held* XRF (kolommen rechts). Zie ook onderschrift tab. 3 en 4.

3.4 Ovenwand

De gevonden ovenwanddelen zijn vergelijkbaar met die van de haardwand (zie 3.6). De grootste verschillen betreffen het formaat en dikte van de fragmenten, waarbij die van de ovenwand groter en dikker zijn. Daarnaast bestaan verschillen in kleur en verglazing. Ovenwand is in veel gevallen opgebouwd uit oranje gebrande, vaak zandige leem die aan de zijde van de voormalige binnenkant van de oven donker gesinterd en heel af en toe glazig kan zijn. De oranje kleur wijst op een temperatuur van 500-600 °C, de donker gesinterde leem op een temperatuur van ca. 700 °C.²³ Echte verglazing vindt plaats vanaf 900-950 °C en is in een oven in de regel alleen rond de luchtinlaat, de tuyere, aanwezig.

²² Misra *et al.* 1993, 111.

²³ Patel 2004, 11-12.



Afb. 5a: buitenzijde van ovenwand V103.
De schaalverdeling is in cm.



Afb. 5b: binnenzijde van ovenwand V246. De wand is sterk gesinterd en deels met roestige slak bedekt.
De schaalverdeling is in cm.

De in Wehl gevonden ovenwanddelen tonen alle hierboven beschreven kleurgradaties (afb. 5a-b). Verglazing treedt in bijna 40% van de fragmenten op, wat vrij veel is. Niettemin zijn geen sporen van de tuyere in de vorm van een ronde doorboring of hoekige uitsnede (voor een bloktuyere) waargenomen. Vanwege het hoge percentage verglaasde delen zouden enkele van de hier opgevoerde fragmenten in werkelijkheid delen van een smeedhaard kunnen zijn. Wordt echter naar de dikte van de leemdelen gekeken, dan ligt deze gemiddeld bij ca. 3 cm (varieert tussen ca. 1 en 8 cm). Dat is dikker dan het gemiddelde van leemdelen van een smeedhaard dat normaliter bij 1-2 cm ligt. De ovenwand heeft een middelgrof zandige textuur en is voor bijna 90% niet magnetisch.

De oorspronkelijke ovenwand zal aan de onderzijde minstens 10 cm breed zijn geweest. Dit is afgeleid van andere, beter geconserveerde ovenresten die in Noordwest-Europa zijn gevonden. De wanddikte varieert in het algemeen tussen ca. 5 cm en 30 cm, afhankelijk van vorm (schachtoven, koepeloven) en hoogte.²⁴ Gezien de diameter van de oven (vermoedelijk ca. 35 cm aan de binnenzijde), de vorm van tot dusverre gevonden en gereconstrueerde ovens in Nederland en de structuur van de slak, zal de oven in Wehl een cilindrische tot conische ovenschacht met een hoogte van ca. 1 m hebben gehad.²⁵ Interessant in dit opzicht is ook de beschrijving van een ijzeroven die in 1916 dicht bij de Beekse kerk bij Bergh tijdens grondwerk is gevonden. Het oventje had de vorm van een ouderwetse bijenkorf, was ca. 80 cm hoog en ca. 70 cm breed.²⁶ Mocht deze beschrijving ook op de oven van Wehl van toepassing zijn, dan zal de ovenwand 15-20 cm dik zijn geweest. Eén stuk ovenwand is chemisch geanalyseerd (tab. 7). Daarbij is de ovenwand van buiten naar binnen in zones verdeeld, van oranjerode leem naar roodpaars, grijs, gesinterd en verglaasd. Interessant is hierbij dat enkel in de smalle verglaasde zone aan de binnenzijde van de oven de samenstelling van de ovenwand onder invloed van erts en houtskool is veranderd. De overige zones hebben nagenoeg hetzelfde chemische profiel. Dat wil zeggen dat de oventemperatuur relatief laag zal zijn geweest.

²⁴ De Rijk 2007, 156.

²⁵ De structuur van de slak wijst op een relatief lage oventemperatuur (zie ook 5). Eenvoudig gesteld is de temperatuur in grote ovens hoger dan in kleine.

²⁶ Tinneveld 1950.

monster	VI03-01 (a)	VI03-01 (b)	VI03-01 (c)	VI03-01 (d)	VI03-01 (e)
SiO ₂	66,8	69,8	76,8	80,3	75,4
TiO ₂	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
Al ₂ O ₃	8,9	9,6	8,1	8,0	8,1
FeO	3,3	3,3	3,2	3,7	7,6
MnO	0,0	0,1	0,1	0,2	1,2
MgO	-	-	-	-	-
CaO	0,2	0,2	0,2	0,4	4,5
Na ₂ O	-	-	-	-	-
K ₂ O	1,6	1,6	1,7	1,7	3,0
P ₂ O ₅	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7
<i>totaal</i>	<i>81,5</i>	<i>85,3</i>	<i>90,7</i>	<i>95,0</i>	<i>110,8</i>

Tab. 7: chemische samenstelling van ovenwand in %, gemeten met de *hand-held* XRF en geconverteerd naar oxides. (a): orangerode leem, (b): roodpaarse leem, (c): grijze leem, (d): leem met vesiculaire structuur, (e): licht verglaasde leem.

3.5 Wolf

De wolf is het gewenste eindproduct van de toenmalige (directe) ijzerproductie. Anders dan het tegenwoordige (indirecte) proces in een hoogoven wordt tijdens het directe proces niet het ijzer, maar alleen de slak vloeibaar. Het ijzeroxide in het erts reduceert hierbij tot metallisch ijzer in de vorm van korrels en ijzerhuidjes. De slak omringt het metallische ijzer en transporteert deze tot onder in de ovenschacht. Daar wordt de slak uit de oven getapt en wordt het metallische ijzer uitgefilterd. Dit blijft onder in de oven achter en klontert samen met slak en houtskool tot een geheel dat meerdere kilo's zwaar kan zijn. Dit conglomeraat wordt wolf genoemd. Afhankelijk van het productieproces kan deze wolf een dichte of open structuur hebben en een sterk wisselende hoeveelheid slakinsluitingen.²⁷

²⁷ Nikulka 1995, 263.



Afb. 6a: mogelijke gromp V491. De scheuren in het roestige oppervlak zijn een indicatie voor een ijzeren kern. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 6b: als ovenslak geïnterpreteerd fragment (V690). Het stuk heeft een meer slakachtig oppervlak dan V491. De schaalverdeling is in cm.

Omdat de wolf het gewenste eindproduct was, wordt deze in de regel niet op opgravingen gevonden.²⁸ Wat wel gevonden wordt, zijn kleine ijzerrijke brokjes die niet tot een groter geheel zijn samengeklonterd of bij het leeghalen van de oven, dan wel bij de verdere bewerking van de wolf, van de wolf zijn gebroken. Dit soort stukjes wordt gromp genoemd.²⁹

In Wehl is één fragment gevonden dat mogelijk als gromp te duiden is. Het fragment is sterk magnetisch, roestig en meet ca. 3 x 3 x 2 cm (afb. 6a). Het gewicht is 29 g. Wolf en gromp zijn niet altijd eenvoudig te herkennen. Zij kunnen makkelijk verwisseld worden met verroeste ijzeren gebruiksvoorwerpen of als (ijzerrijke delen van) productie- of herverhittingslak geïnterpreteerd worden (afb. 6b). Zonder de stukken door te zagen of röntgenopnames te maken, is het vrijwel onmogelijk na te gaan of in de gevonden klomp roest (nog) metallisch ijzer aanwezig is. De magnetische aantrekking kan enkel als indicatie dienen.

3.6 Ijzerrijke smeedslak

De in de oven gewonnen wolf moet verder bewerkt worden tot smeedbaar ijzer. Dit wordt met het begrip herverhitten aangeduid. Tot nu toe bestaat geen consensus over hoe en waar dit gedaan werd. In het algemeen zal de eerste stap bestaan uit het scheiden van de ijzerrijke delen van de wolf van de ijzerarme delen. Daarna zal het ijzerrijke deel, eventueel in handzame stukken gekliefd, in een smeedhaard zijn verhit en voorzichtig zijn bewerkt om de ingesloten productieslak te verwijderen en het ijzer te verdichten. Deze procesgang is hoofdzakelijk uit de etnografie en experimentele archeologie bekend.³⁰ In de praktijk zijn maar weinig vindplaatsen met herverhittingslak opgegraven.³¹

De slak die bij het herverhitten in de smeedhaard ontstaat, lijkt op smeedslak. In het Engels wordt het

²⁸ Een uitzondering is een brok van 11,5 kg dat tijdens de opgravingen in de Romeinse nederzetting met ijzerproductie bij Heeten in een waterput is gevonden (Groenewoudt & van Nie 1995, 204; Godfrey 2007, 184; Godfrey & van Nie 2004, 1119).

²⁹ Godfrey 2009, 36.

³⁰ Onder andere Crew 1991, 29. Crew & Salter 1991, 18-19. Sim 1998, 31.

³¹ In Nederland is vooral Wesepe een belangrijke vindplaats. Hier zou in de Romeinse tijd wolf uit meerdere productieplaatsen uit de omgeving zijn herverhit en verder bewerkt (Groenewoudt & van Nie 1995, 203). Daarnaast kon ook in Apeldoorn het herverhitten in de Romeinse tijd worden aangetoond (De Rijk 2013, in druk).

herverhitten dan ook treffend als *primary smithing* omschreven en het smeden als *secondary smithing*. Beide zijn het resultaat van de reactie van het oppervlakteoxide van het ijzer met de leem van de haardbekleding, de brandstofas en een eventueel toegevoegd vloeimiddel. Ook vloeit in het ijzer ingesloten productieslak in de haard, waarbij de hoeveelheid slak in wolf uiteraard veel groter is dan die in smeedijzer. Bijgevolg zal herverhittingslak (in theorie) groter zijn dan smeedslak en ook roestiger omdat vaker ijzerrijke delen van wolf zullen breken dan van massief ijzer. Indien direct aansluitend aan het herverhitten in dezelfde haard is gesmeed, kan alleen een zeer groot slakformaat een indicatie voor het herverhitten zijn. In het algemeen heeft smeedslak een diameter van maximaal ongeveer 15 cm.

De smeedslak van Wehl is vrij klein en licht in vergelijking tot smeedslak van andere vindplaatsen uit de Romeinse tijd en Middeleeuwen. De stukken wegen gemiddeld 27 g, waarbij het zwaarste stuk 350 g weegt. Het grootste exemplaar meet ca. 9 x 10 x 2 cm (afb. 7a).

Net als de oven werd de smeedhaard met houtskool gestookt. Afdrukken van houtskool komen in ongeveer elke derde slak voor en insluitingen hiervan in elk vijfde stuk. Houtskool was tot de Late Middeleeuwen de meest gebruikte brandstof in de smeedhaard, tot het door de houtcrisis vanaf ongeveer de 13^e eeuw geleidelijk vervangen werd door steenkool.³²

De slak die in met houtskool gestookte smeedhaarden ontstaat, is vaak planoconvex.³³ Deze vorm is het resultaat van temperatuurverschillen in het houtskoolbed. Doordat houtskool cirkelvormig brandt, breidt de temperatuur zich (half-)bolvormig uit vanuit het punt waar de luchtstroom uit de blaasbalg het houtskoolbed treft. De slak druppelt in de haard en stolt daar langs een isolijn met een bepaalde temperatuur. De planoconvexe vorm geeft dus de vorm van het houtskoolbed weer en niet de vorm van de haard. De laatste kan alleen gereconstrueerd worden als delen van de haardwand aan de slak hechten. Dit is in Wehl bij vier stukken het geval. Op grond hiervan lijkt de haard minstens één vlakke zijde te hebben gehad (de zijde met het hitteschild), die gerond in een concave bodem over ging. Het is onduidelijk of de haard in de bodem ingegraven of verhoogd was. De verhoogde smeedhaard is in Europa sinds de Romeinse tijd uit afbeeldingen bekend.³⁴ De ingegraven versie, danwel de haard op bodemniveau wordt nauwelijks afgebeeld.³⁵ De concave bodem kan een aanwijzing zijn dat de smeedhaard in Wehl op loopniveau lag. Een vlakke bodem zou eerder op een verhoogde haard duiden.

³² Bartels 2000, 17.

³³ Dat wil zeggen vlak van boven en half bol van onder.

³⁴ O. a. Weisgerber & Roden 1985.

³⁵ Een uitzondering is Bodleian Library Ms 264 f 84T (Tylecote 1981, 44 afb. 39). Een goed archeologisch voorbeeld is de smeedhaard die in Manchester is opgegraven (Cleland 1981, 167).



Afb. 7a: bovenzijde van ijzerrijke smeedslak V285. Aan de rechterzijde stond het hitteschild met daarachter de blaasbalg. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 7b: onderzijde van ijzerrijke smeedslak V614. De slak is tussen houtskool door gedruppeld. De schaalverdeling is in cm.

Een groot aantal stukken (ca. 40%) heeft een soort van opengewerkte structuur. De slak is hier tussen het houtskool in de haard gedruppeld en vervolgens gestold (afb. 7b). Dergelijke slak is eerder al als ovenslak geïnterpreteerd (vergelijk afb. 4a). In het algemeen is genoemde structuur een aanwijzing voor een laagviskeuze slak en een vrij hoge temperatuur. Dat deze slak ook werkelijk als smeedslak mag worden geïnterpreteerd, kan uit de verschillen in de vesiculair structuur en vooral de chemische samenstelling worden afgeleid (zie onder): het aantal gasblaasjes op het breukvlak is lager dan dat in ovenslak en ligt tussen 10 en 30%. Ook zijn ze beter gesorteerd, wat op een snelle afkoeling wijst van zowel het slakoppervlak als van de slakkern. Dit is gebruikelijk bij smeedslak.

Ongeveer 35% van de slak is (partieel) magnetisch. In verhouding tot andere vindplaatsen met smeedslak is dit een laag tot middelhoog aandeel. Het magnetisme wijst erop dat ijzer in metallische vorm of als het oxide magnetiet in de slak is opgenomen. Theoretisch zal het aandeel magnetische slak toenemen naarmate meer ijzer bij het smeden verloren gaat, bijvoorbeeld door het vaak en op (te) hoge temperatuur te verhitten. Een hoge temperatuur zorgt er echter ook voor dat het ijzer sneller met de haardwand en brandstofas reageert, waardoor slak gevormd wordt en de magnetische aantrekking verloren gaat. Afhankelijk van de hoeveelheden as, leem en ijzer in de haard zal er meer of minder magnetische slak worden gevormd en minder of meer silicaatrijke slak. Bovendien speelt ook het soort ijzer waarmee gesmeed wordt een rol. Ijzer met veel (niet magnetische) slakinsluitingen zal, alweer in theorie, in een lager aandeel magnetische slak resulteren dan ijzer met minder of geen insluitingen omdat in verhouding de hoeveelheid niet-magnetische slak toegenomen is.

Twee stukken ijzerrijke slak zijn chemisch geanalyseerd om de optische determinatie te toetsen (tab. 8). In vergelijking tot de geanalyseerde productieslak zijn het relatief hoge ijzergehalte (FeO) en, daaraan gekoppeld, het relatief lage siliciumgehalte (SiO_2) van de ijzerrijke smeedslak opvallend. Nog duidelijker echter worden de verschillen bij het mangaangehalte (MnO). Mangaan wordt bij de ijzerproductie bij voorkeur door de slak opgenomen. Bijgevolg is het geproduceerde ijzer arm aan mangaan. Wordt dit ijzer gesmeed, dan zal ook de hierbij gevormde slak maar weinig mangaan bevatten.

monster	V614-01	V614-02	V614-01	V614-02
SiO ₂	6,5	18,4	11,9	21,3
TiO ₂	0,0	0,1	0,0	0,1
Al ₂ O ₃	0,9	1,3	4,3	5,6
FeO	70,6	56,9	90,9	70,1
Fe ₂ O ₃	78,5	63,2	101,0	77,9
MnO	0,6	0,4	0,5	0,5
MgO	0,4	0,3	-	-
CaO	0,6	1,8	0,7	2,4
Na ₂ O	0,1	0,2	-	-
K ₂ O	0,2	0,5	0,5	1,0
P ₂ O ₅	0,5	1,0	1,3	2,8
<i>totaal</i>	<i>88,3</i>	<i>87,1</i>	<i>110,0</i>	<i>104,0</i>
LOI	-6,7	-2,4	-	-

Tab. 8: chemische samenstelling van ijzerrijke smeedslak in %, gemeten met de WD-XRF in de laboratoriumopstelling (kolom links) en met de *hand-held* XRF (kolommen rechts). Zie ook onderschrift tab. 3 en 4.

3.7 Silicaatrijke smeedslak

Afhankelijk van de verhouding tussen de in 3.6 genoemde slakvormende componenten (ijzeroxide, leem, brandstofas, vloeimiddel, slakinsluitingen) ontstaat een ijzerrijke tot ijzerarme smeedslak. De overgang tussen beide is glijdend. De silicaatrijke slak is voornamelijk het reactieproduct van de componenten brandstofas en leem van de haardbekleding. Zij heeft een onregelmatig-afgeronde vorm, is licht en vesiculair. Dikwijls komen verglaasde delen voor. Silicaatrijke slak kan in principe bij elk proces ontstaan waarbij warmte een rol speelt. Bij een ontstaan in de smeedhaard kan dit type slak roestbruine, ijzerrijke plekken tonen. Hun herkomst in de smeedhaard wordt vooral duidelijk als een combinatie van ijzerrijke en silicaatrijke slak wordt gevonden.³⁶ Dit laatste is in Wehl het geval. Het betreft 7 kleine, onregelmatig gevormde fragmenten die in de regel van grotere stukken slak zijn gebroken. Zij meten gemiddeld 2 x 2 x 1 cm en wegen rond 5 g. De meest opvallende uiterlijke verschijning van dit soort slak is, naast het verhoudingsgewijs geringe gewicht, de verglazing (afb. 8a). Met betrekking tot het magnetisme is ongeveer 60% partieel lichtmagnetisch.

³⁶ Young 2003, 53.



Afb. 8a: silicaatrijke smeedslak V564. De schaalverdeling is in cm.



Afb. 8b: de naar het vuur gerichte zijde van haardwandfragment V688. Het fragment is verglaasd en bedekt met een roestig en leemachtige laag. De schaalverdeling is in cm.

3.8 Haardwand

Onder haardwand worden met name delen van het hittedeksel bedoeld dat tussen de smeedhaard en de blaasbalg stond en de laatste tegen hitte en vonken uit de haard beschermde.³⁷ Het hittedeksel bestond uit een opstaand lemen wandje dat aan één zijde van de haard was opgebouwd en in het midden een doorboring had waar de lucht doorheen geblazen werd. Meer dan 40% van de in Wehl gevonden haardwanddelen zijn aan de naar het vuur gerichte zijde groen tot zwart verglaasd, de andere zijde is roodbruin tot lichtgrijs en matig tot hard gebrand (afb. 8b). De overige 60% heeft in plaats van een verglaasd oppervlak een meer gesinterd uiterlijk. Zij hebben een dikte van nog ongeveer 2 cm en in één geval van bijna 4 cm. Oorspronkelijk zullen zij een dikte van minstens 10 cm hebben gehad. Een verschraving, anders dan middelfijn zand, is niet waargenomen.

4 Slakverspreiding

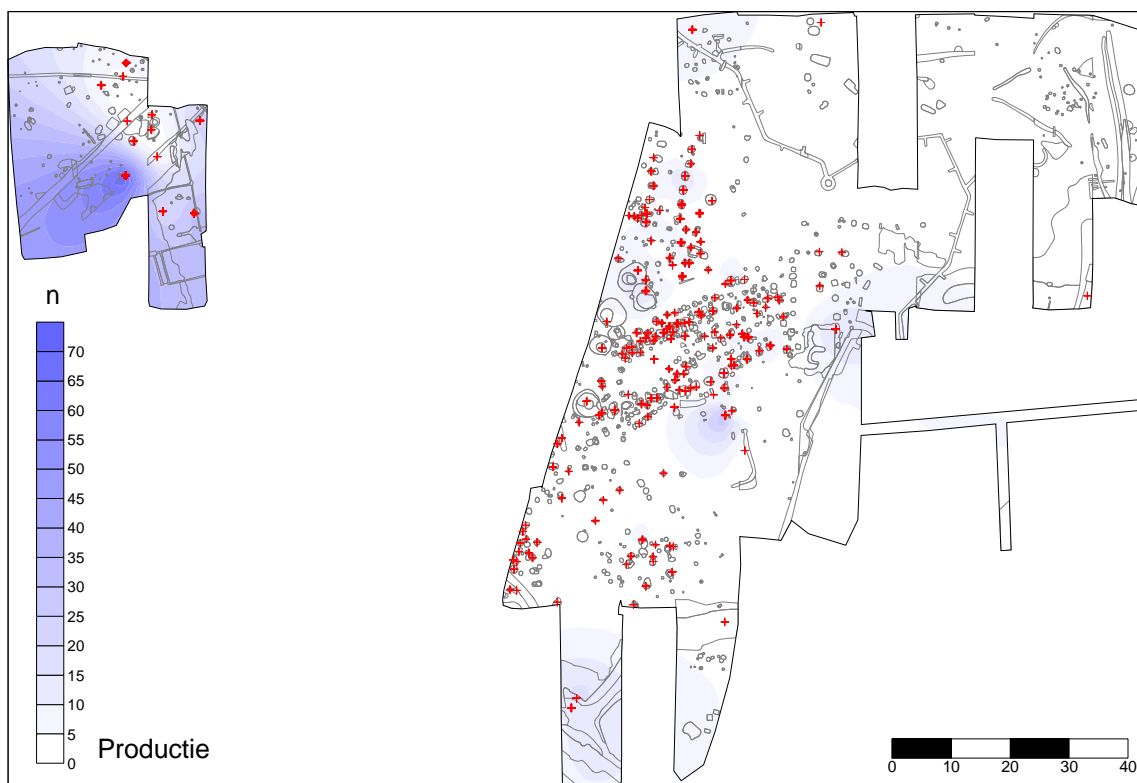
De slak komt uit 230 sporen, waaronder (paal-)kuilen, greppels en waterputten (tab. 9). De meeste slak komt uit paalkuilen, gevolgd door kuilen, waarna de rest met achterstand volgt. Met betrekking tot het slaggewicht komen de kuilen echter op de eerste plaats. Het geringe aantal kuilen in vergelijking tot het aantal paalkuilen geeft aan dat vooral grote stukken slak in kuilen zijn gestort, terwijl de kleinere stukken in de loop der tijd in paalkuilen terecht zijn gekomen. Wordt de slak ook nog uitgesplitst naar categorie, dan valt op dat met name het smeedafval in paalkuilen is teruggevonden, terwijl productieslak in min of meer gelijke mate over kuilen en paalkuilen is verdeeld.

³⁷ De lemen bekleding van de smeedhaard wordt in de regel niet los gevonden maar hecht meestal aan smeedslak.

aard spoor	aantal sporen met slak	n	G (kg)
greppel	8	69	4,9
hutkom	2	18	2,1
kuil	29	214	60,8
vlak	4	58	5,9
paalkuil	152	534	29,5
natuurlijk spoor	3	3	0,2
waterput	4	52	9,9
onbekend	28	33	3,3
<i>totaal</i>	<i>230</i>	<i>981</i>	<i>116,6</i>

Tab. 9: aantal (n) en gewicht (G) van slak per spoortype.

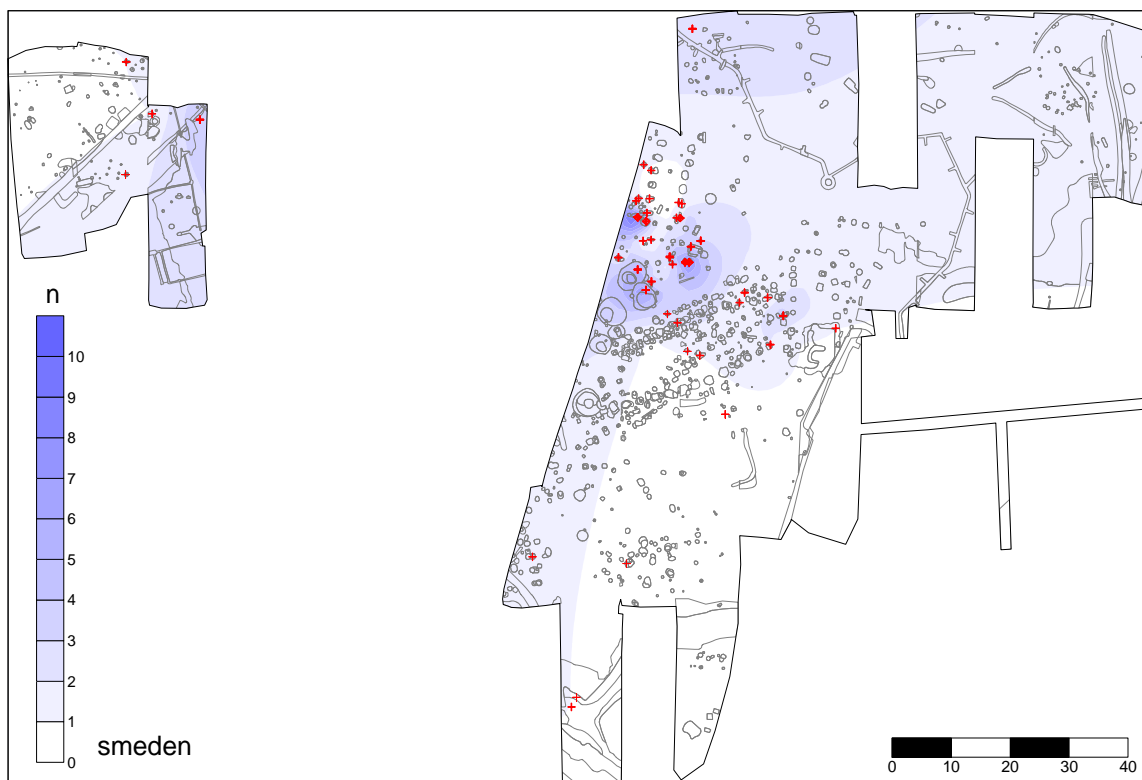
Slak kan op twee tijdstippen in een paalkuil terecht komen. Als eerste bij het graven van de kuil en het aanvullend dichtstorten daarvan nadat de paal in de kuil is geplaatst; dit veronderstelt dat op dat tijdstip reeds slak op de werkplaats aanwezig is. En als tweede na opgave van de houten structuur waarbij de palen of uitgetrokken worden of wegrotten en het paalgat doelbewust danwel in de loop der tijd met bodemmateriaal en slak is opgevuld; in dit geval zal de slak ten vroegste gedurende de levensduur van de houten structuur ontstaan. Gezien de grote hoeveelheid slak in paalkuilen is aan te nemen dat in beide gevallen het loopvlak op een bepaald tijdstip bezaaid lag met slak en wel met zowel productieslak als smeedslak.



Afb. 9: interpolatiemodel van de verspreiding van productieslak naar aantal. De plustekens geven de vindplaatsen weer.

Kuil S7054, waarin qua gewicht meer dan een kwart van alle slak is aangetroffen, is aan de hand van aardewerk tussen 800 en 1100 n. Chr. gedateerd. De ijzerproductie en het smeden van ijzer zal in deze periode hebben plaatsgevonden. Vermoedelijk is hiermee ten tijde van de bewoning begonnen. Het afval van de ijzerproductie werd zoals gebruikelijk op één of meerdere slakhopen gestort en pas nadat enkele malen ijzer was gewonnen in kuilen geschoven en over het terrein verspreid geraakt. Bovengenoemde kuil is hiervan een mooi voorbeeld. Hierin zijn behalve de houtskoolrijke delen uit de oven zelf, vooral grote en incomplete stukken tapslak aangetroffen die afkomstig zijn van verschillende productiegangen. Dit is alleen mogelijk als de slak in eerste instantie op een andere plek lag. Na opgave van de houten structuren zal de slak ook in de paalgaten terecht zijn gekomen.

De plaats van de oven of ovens is niet precies meer te lokaliseren. Eén of meerdere ovens zullen bij kuil S7054 in de buurt hebben gestaan. In dit deel van het opgegraven terrein is veruit de meeste productieslak en ovenwand gevonden (afb. 9). Het is goed mogelijk dat de oven(s) zich aan de westelijke rand van de nederzetting bevonden.

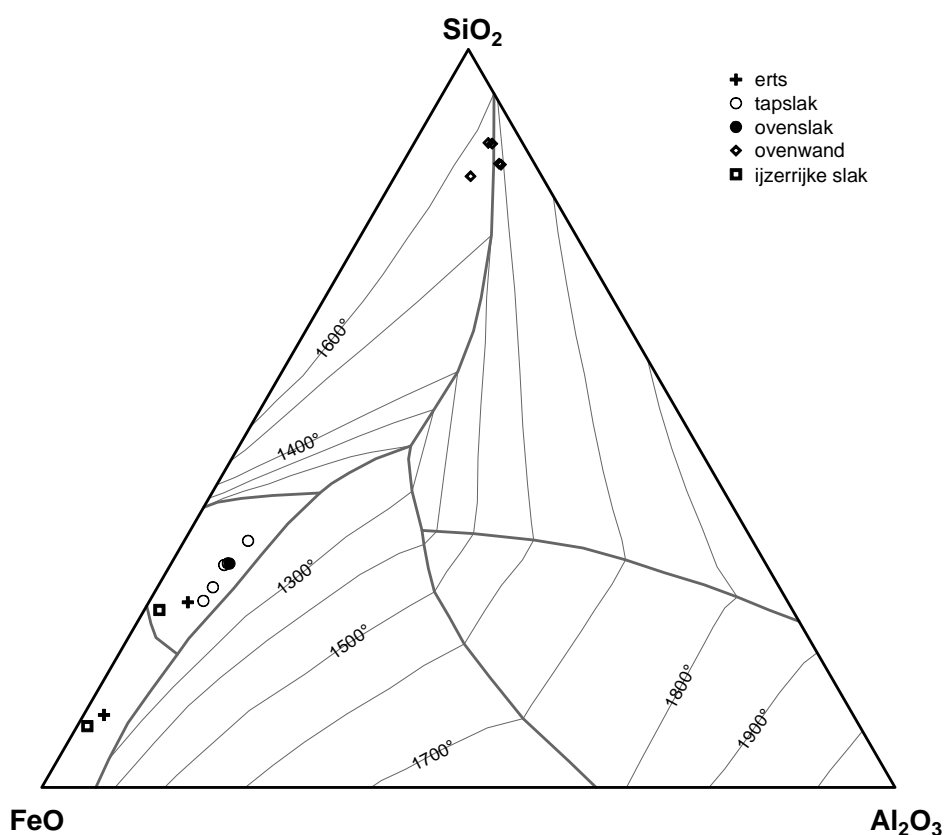


Afb. 10: interpolatiemodel van de verspreiding van smeedafval naar aantal. De plustekens geven de vindplaatsen weer.

Het smeden lijkt meer in het noordelijke deel van het midden van het opgegraven terrein te hebben plaatsgevonden (afb. 10). De plaats van de smederij is aan de hand van de verspreiding van het smeedafval alleen globaal te bepalen. In het algemeen lijkt een nauwe relatie tussen het produceren en smeden van ijzer te bestaan omdat zowel het smeed- als productieafval in een relatief klein gebied en veelal ook in dezelfde sporen is gevonden.

5 Oventemperatuur, opbrengst en kwaliteit van het ijzer

De oventemperatuur kan aan de hand van de chemische samenstelling van met name tapslak en met behulp van een $\text{SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$ diagram worden afgeleid. Uit dit diagram blijkt een smelttemperatuur van 1150-1200 °C (afb. 11). Dit is de laagst mogelijke smelttemperatuur voor slak met een fayalitische samenstelling. Met betrekking tot de chemische samenstelling van de slak is gebruik gemaakt van de waarden die met de WD-XRF in de laboratoriumopstelling zijn verkregen. De waarden van de *hand-held* XRF wijken te veel af van de waarden van de WD-XRF, zelfs als beide metingen naar 100% genormaliseerd worden.³⁸ Ofschoon de *hand-held* XRF als analysemethode grote voordelen heeft qua snelheid en kosten, is deze methode (nog) niet geschikt voor bulkanalyses zoals die bij heterogene slak nodig zijn.



Afb. 11: $\text{SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$ fasediagram. Alle tap- en ovenslak valt in het fayalitische bereik, waarvoor een smelttemperatuur van 1150-1200 °C geldt. De chemische samenstelling van de slak is met de WD-XRF in de laboratoriumopstelling gemeten. De ovenwand is met de *hand-held* XRF gemeten en als indicatief voor deze categorie opgenomen.

Het rendement van het productieproces kan eveneens met de chemische samenstelling van de slak worden bepaald. Simpel gezegd, moet dat wat de oven in gaat er ook weer uitkomen. Dus: erts + houtskool + leem van de ovenwand = slak + ijzer. Als de chemische samenstelling bekend is van al deze ingrediënten, kan met behulp

³⁸ De verschillen zijn met gemiddeld 3% voor TiO_2 het laagst, gevolgd door FeO met 4% en SiO_2 en CaO met 10%. De verschillen zijn bij Al_2O_3 met gemiddeld 90% het hoogst. De marges zijn in alle gevallen erg groot.

van matrix inversie de verhouding erts : houtskool : leem worden berekend en hiermee weer de hoeveelheid geproduceerd ijzer. Omdat de waarden van houtskool en leem evenwel niet bekend zijn, wordt voor de bepaling van het rendement enkel van het erts uitgegaan. Dit kan als volgt worden berekend:

$$Fe_{\text{erts}} - Fe_{\text{slak}} = Fe_{\text{geproduceerd}}^0$$

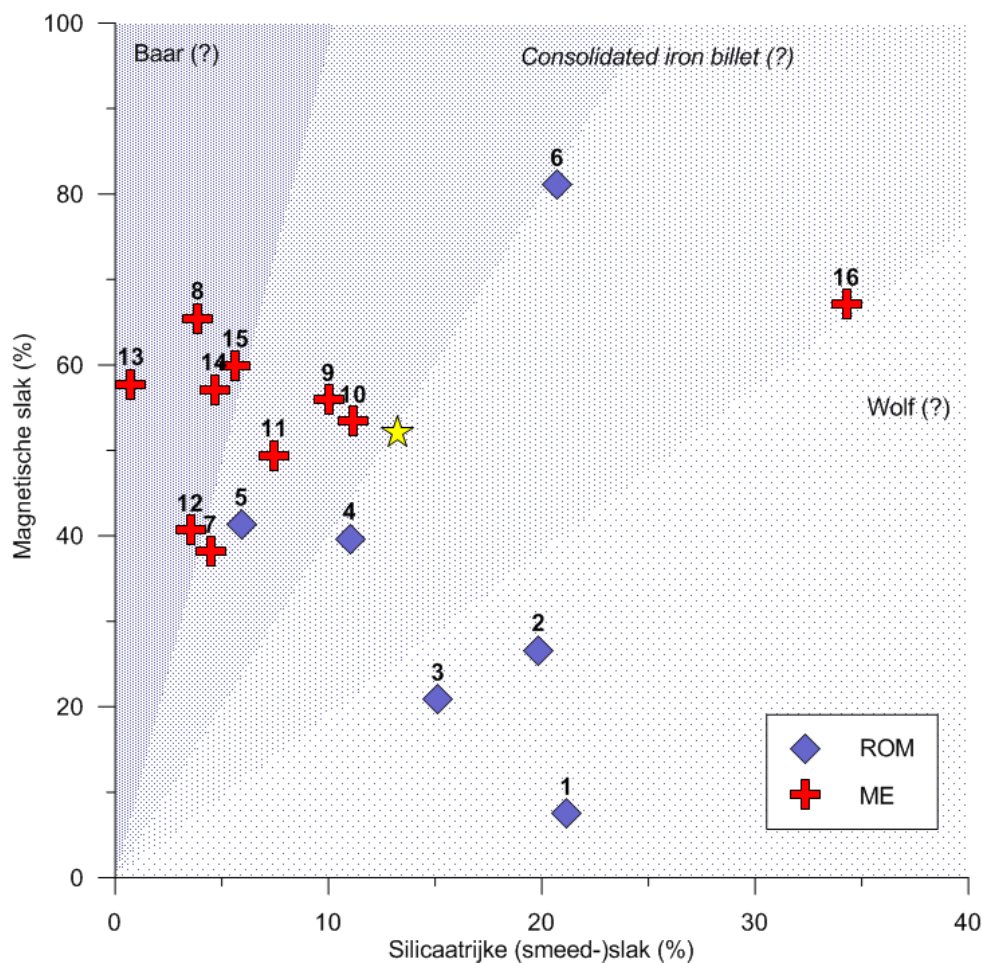
Hieruit volgt dat van 53 eenheden ijzer in het erts (V599-10) er gemiddeld 35 in de slak verdwijnen (V204-12, -13, -18, V611-1, V612-2) en er dus gemiddeld 18 overblijven. Dat is een rendement van ongeveer 34%. Dat is een stuk lager dan het rendement van 50-65% dat door Joosten voor Wehl berekend is.³⁹ Hiervoor zijn meerdere redenen mogelijk. Ten eerste hoeven de geanalyseerde slak en erts niet representatief te zijn voor de ijzerproductie op de onderzoekslocatie. Ten tweede kunnen onnauwkeurigheden in de analysesresultaten bestaan en ten derde kan het rendement ook werkelijk lager zijn geweest.⁴⁰ Terwijl bij Joosten uitgegaan wordt van grootschalige ijzerproductie en de slak van grote slakhopen komt, lijkt op de onderzoekslocatie eerder sprake te zijn van kleinschalige productie voor de eigen behoefte en uitgevoerd door de bewoners van de nederzetting. De hoeveelheid geproduceerd ijzer, gebaseerd op de totale hoeveelheid gevonden productieslak, is ongeveer 20 kg.⁴¹

Het ijzer uit de oven bewerkte de smid verder tot objecten. Er zijn geen duidelijke aanwijzingen voor het herverhitten. Het is daarom goed mogelijk dat de smid de wolf als uitgangsmateriaal gebruikte. De kwaliteit daarvan werd voornamelijk bepaald door de hoeveelheid in het ijzer ingesloten slak. Door de verhouding tussen de verschillende categorieën smeedafval en het magnetisme te onderzoeken, is het eventueel mogelijk iets over de kwaliteit van het gebruikte ijzer te zeggen.

³⁹ Joosten 2004, 109.

⁴⁰ Een rendement van ca. 34% valt binnen de waardes die voor de ijzerproductie op de Veluwe in de 7^e-9^e eeuw zijn berekend en waar waardes van 30-50% worden behaald (Joosten 2004, 82).

⁴¹ Tap- en ovenslak: 108,1 kg x 0,18 = 19,6 kg ijzer.



Afb. 12: verhouding tussen het percentage silicaatrijke (smeed-)slak en magnetische slak. 1: Woerden (1^e-2^e eeuw). 2: Venlo (1^e-2^e eeuw). 3: Midlaren (1^e-4^e eeuw). 4: Heerlen (1^e-4^e eeuw). 5: Feddersen-Wierde (2^e-3^e eeuw). 6: Flögel-Eekhöltjen (2^e-5^e eeuw). 7: Niens (7^e-9^e eeuw). 8: Dalem (7^e-14^e eeuw). 9: Berkel-Enschot (8^e-10^e eeuw). 10: Wijk bij Duurstede (8^e-10^e eeuw). 11: Limmen (8^e-10^e eeuw). 12: Wierden (9^e-11^e eeuw). 13: Deventer (10^e-12^e eeuw). 14: Tilburg (10^e-12^e eeuw). 15: Leiden (12^e-13^e eeuw). 16: Veldhoven (ME).

Ster: onderzoekslocatie.

Op de Feddersen-Wierde, in Dalem en Niens werden ijzerbaren aangetroffen. In Midlaren werd een *consolidated iron billet* gevonden.⁴²

Zoals reeds bij de beschrijving van de aangetroffen slaktypen is aangegeven, is het aandeel (partieel) magnetische slak laag tot middelhoog. Het aandeel silicaatrijke slak en hardwand is eveneens laag tot middelhoog. Deze twee aandelen staan in een bepaalde verhouding tot elkaar die in hoge mate door de kwaliteit van het ijzer en de smeedtemperatuur bepaald wordt. Immers, hoe schoner het ijzer, hoe hoger het aandeel magnetische slak en tegelijk hoe lager de smeedtemperatuur behoeft te zijn waardoor weer minder silicaatrijke slak wordt gevormd. Theoretisch zou de verhouding tussen silicaatrijke slak en magnetische slak dus omgekeerd evenredig moeten zijn. In de praktijk, gemeten aan zestien vindplaatsen met smeedslak in Nederland en Noordwest Duitsland uit de Romeinse tijd en Middeleeuwen, lijkt deze verhouding een meer

⁴² De Rijk 2005, 2006, 2007, 2008a-b, 2009, 2010, 2012a-b. Schuster & De Rijk 2002.

onregelmatig patroon te vertonen waarbij het percentage silicaatrijke slak tussen ca. 0 en 20% en het aandeel magnetische slak tussen ca. 20 en 80% ligt (afb. 12). Opvallend is hierbij dat de Laat Middeleeuwse vindplaatsen in het algemeen een lager aandeel silicaatrijke slak opleveren dan de Vroeg Middeleeuwse en Romeinse vindplaatsen. Het is goed mogelijk dat de in de loop der tijd toegenomen kwaliteit van het ijzer hieraan debet is. In afb. 12 worden drie typen ijzer genoemd: wolf, *consolidated iron billet* en baar. De wolf bevat de meeste slak en wordt gevolgd door de gesmede wolf of *consolidated iron billet*, dat een wisselende hoeveelheid slakinsluitingen kan bevatten. De baar tenslotte is ijzer met slechts nog een geringe hoeveelheid slak. De slak van Wehl valt in het bereik dat ingenomen wordt door de *consolidated iron billet* en gaat richting wolf. Het is goed mogelijk dat dit de kwaliteit was van het ijzer dat in de oven werd gewonnen.

6 Beantwoording onderzoeksvragen

Twee van de 34 vragen in het PvE hebben deels betrekking op het slakonderzoek. Het betreft de vragen 9 en 12 die nauw met elkaar verbonden zijn.

9. *Wat kan worden gezegd over de economische bestaansbasis van de nederzetting/huisplaatsen?*
12. *Wat omvat de materiële cultuur van de verschillende bewoningsfasen (typochronologie en ontplooiden activiteiten)?*

De onderzochte slak toont dat in Wehl zowel ijzer geproduceerd als ook gesmeed werd. Bij de productie werden klapperstenen als erts gebruikt die waarschijnlijk in kuilen in het Bergherbos, ca. 3 km ten zuiden van de onderzoekslocatie, werden gewonnen. De productie vond plaats in kleine ovens, waarschijnlijk 0,8-1,0 m hoog en met een binnendiameter van ca. 0,35 m. De dikte van de wand zal 15-20 cm zijn geweest (gebaseerd op een ovenvondst in de omgeving). De oven of ovens stonden in het westelijke deel van het opgegraven terrein, mogelijk aan de westelijke rand van de nederzetting. Zij werden meermaals gebruikt.

Tijdens de productie werd slak uit de oven getapt. Deze vloeide in een V-vormig kanaal danwel lichte verdieping voor de oven. Doordat de ruimte voor de oven steeds werd leeggeruimd, kwam deze ruimte steeds dieper te liggen. In één oven is minstens vijf maal ijzer geproduceerd. De slak werd in de buurt van de oven(s) op een hoop gegooit.

De oventemperatuur lag bij ca. 1200 °C. Het rendement was ongeveer 34%. Berekend naar de totale hoeveelheid gevonden productieslak (ca. 108 kg) is ca. 20 kg ijzer gewonnen. Zowel de geringe hoeveelheid slak als het lage rendement wijzen op productie voor de eigen behoefte. De kwaliteit van het ijzer kan als redelijk worden ingeschat. Er zijn geen aanwijzingen gevonden voor het herverhitten van de wolf. Daarom wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de wolf, na grof te zijn bewerkt (scheiden van ijzerarme en ijzerrijke delen, eventueel klieven) direct door de smid in de smeedhaard tot objecten werd bewerkt. De smederij lag waarschijnlijk meer naar het midden van het opgegraven terrein, maar nog altijd dicht genoeg bij de ovens.

De smeedhaard lag vermoedelijk op vloerniveau. Aan één zijde stond het hitteschild dat de blaasbalg tegen de hitte en vonken uit de haard beschermde.

Na verloop van tijd raakte het slakmateriaal over het opgegraven terrein verspreid en kwam na opgave van houten structuren terecht in een groot aantal paalgaten. Deels werden kuilen met opzet met slak opgevuld.

7 Literatuur

Bartels, C., 2000: *Zur Geschichte des Steinkohlenbergbaus*. Voordracht tijdens de 2e Greifswalder Energiekonferenz 18-19 juli 2000.

Cleere, H.F., 1995: Ironworks as World Heritage. In: G. Magnusson (red.), *The importance of ironmaking; technological innovation and social change 1*, 291-298, Stockholm.

Cleland, J., 1981: Roasting, blooming or smithing? *Current Archaeology* 77, 165-167.

Crew, P., 1991: The experimental production of prehistoric bar iron. *Historical Metallurgy* 25:1, 21-35.

Crew, P., Salter, C.J., 1991: Comparative data from iron smelting and smithing experiments. *Materialy Archeologiczne* 26, 15-22.

Duijvenvoorde, R., 2006: Vroeghistorische ijzerproductie in Nederland. *GEA* 39:3, 86-93.

Godfrey, E., Nie, M. van, 2004: A Germanic ultrahigh carbon steel punch of the Late Roman-Iron Age. *Journal of Archaeological Science* 31, 1117-1125.

Godfrey, E., 2007: The technology of ancient and medieval directly reduced phosphoric iron. *Doctoral thesis University of Bradford*.

Godfrey, E., 2009: The significance of gromps. *The Archaeologist* 71, 36-37.

Groenewoudt, B.J., Nie, M. van, 1995: Assessing the scale and organisation of Germanic iron production in Heeten, the Netherlands. *Journal of European Archaeology* 3/2, 187-215.

Heek, J.H.A. van, 1952: De ijzerkuilen van Montferland. *Nederlandse Geologische Vereniging*, publicatie 12, 230-234.

Joosten, I., 2004: Technology of early historical iron production in the Netherlands. *Geoarchaeological and bioarchaeological studies 2*. Amsterdam.

Joosten, I., Nie, M. van, 1996: Experiments with different types of Dutch iron smelting furnace. In: G. Magnusson (red.), *The importance of ironmaking, technical innovation and social change 2*, 87-94, Stockholm.

Kimenai, P., 2011: *Technisch evaluatierapport, Definitief Onderzoek fase 1 en 2, Wehl-Motketel, Gemeente Doetinchem*, Deventer (BAAC-rapport A-10.0262).

Laban, C., Kars, H., Heidinga, H.A., 1988: IJzer uit eigen bodem. *Grondboor en hamer* 42:1, 1-11.

Misra, M.K., Ragland, K.W., Baker, A.J., 1993: Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass and Bioenergy* 4:2, 103-116.

Nikulka, F., 1995: Frühe Eisenerzverhüttung und ihr experimenteller Nachvollzug. Eine Analyse bisheriger Versuche. In: M. Fansa (red.), *Experimentelle Archäologie in Deutschland. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 8*, 255-310. Oldenburg.

Obata, M., Mizuta, T., 1994: Vesicular structure in a lava flow. In: R. Takaki (red.), *Research of pattern formation*, 259-263. Tokyo.

Patel, N.K., 2004: *House construction and destruction patterns of the Early Copper Age on the Great Hungarian Plain*. Dissertatie Ohio State University. Ohio.

Pleiner, R., 1996: Vom Rennofen zum Hochofen; die Entwicklung der Eisenverhüttung, 9.-14. Jahrhundert. In: U. Lindgren (red.), *Europäische Technik im Mittelalter 800 bis 1200; Tradition und Innovation*, 249-256, Berlin.

- Pronk, E.C., 2010.
- Rijk, P. de, 2005: Slak. In: N.M. Prangma & H. Vanneste (red.), *Middeleeuwse bewoning in Huurne, gemeente Wierden. Definitief archeologisch onderzoek in het tracé van de A35 bij Wierden* (ADC rapport 473), 47-49. Amersfoort.
- Rijk, P. de, 2006: Het slakmateriaal. In: M.F.P. Dijkstra, J. de Koning & S. Lange (red.), *Limmen – De Krocht, de opgraving van een middeleeuwse plattelandsnederzetting in Kennemerland* (AAC rapport 41), 117-121. Amsterdam.
- Rijk, P. de, 2007: De scoriis, Eisenverhüttung und Eisenverarbeitung im nordwestlichen Elbe-Weser-Raum. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet* 31, 95-242. Oldenburg.
- Rijk, P. de, 2008a: Het geheim van de smid: de interpretatie van het slakmateriaal. In: J.A.W. Nicolay (red.), *Opgravingen bij Midlaren. 5000 jaar wonen tussen Hondsrug en Hunzedal*. (Groningen Archaeological Studies 7:2), 401-416. Groningen.
- Rijk, P. de, 2008b: Slakmateriaal. In: E. Blom & W.K. Vos (red.), *Woerden - Hoochwoert. De opgravingen 2002-2004 in het Romeinse castellum Laurium, de vicus en van het schip de 'Woerden 7'* (ADC Rapport 910), 263-267. Amersfoort.
- Rijk, P. de, 2009: Metaalslakken en metaalverwerking in de Romeinse tijd en Middeleeuwen/Nieuwe tijd. In: H.M. van der Velde, S. Ostkamp, H.A.P. Veldman & S. Wyns (red.), *Venlo aan de Maas: van vicus tot stad. Sporen van een Romeinse nederzetting en stadsontwikkeling uit de Middeleeuwen en Nieuwe Tijd in het plangebied Maasboulevard* (=ADC monografie 7 / ADC rapport 1000), 209-214. Amersfoort.
- Rijk, P. de, 2010: Metaalslak. In: M.F.P. Dijkstra & C.R. Brandenburgh (red.), *Leiden – Aalmarktsschool, archeologisch en bouwhistorisch onderzoek naar 800 jaar bewoning langs de Oude Rijn, ter plaatse van het voormalige St.-Catharinagasthuis* (=Bodemonderzoek en Bouwhistorie in Leiden 1), 130-135. Leiden.
- Rijk, P. de, 2012a: Slakmateriaal. In: J. Dijkstra (red.), *Het domein van de boer en de ambachtsman. Een opgraving op het terrein van de voormalige fruitveiling te Wijk bij Duurstede: een deel van Dorestad en de villa Wijk archeologisch onderzocht* (ADC monografie 12), 421-432. Amersfoort.
- Rijk, P. de, 2012b: Metaalslakken. In: B. Van der Veken & A. Müller (red.), *Oerle-Zuid, Veldhoven. Een inventariserend veldonderzoek in de vorm van een karterend en waarderend vuursteenonderzoek en proefsleuven* (ADC rapport 2488), 112-113. Amersfoort.
- Rijk, P. de, 2013 (in druk): Het slakmateriaal van de Herderweg / Ooiweg te Apeldoorn. In: E.H.L.D. Norde (red.), *Titel nog onbekend* (RAAP rapport).
- Schuster, J., Rijk, P. de, 2002: Zur Organisation der Metallverarbeitung auf der Feddersen Wierde. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet* 27, 39-52, Oldenburg.
- Sim, D., 1998: Beyond the bloom, bloom refining and iron artifact production in the Roman world. *BAR International Series* 725, Oxford.
- Tinneveld, A., 1950: Primitieve Liemerse ijzerwinning. *De Liemers* 25:6.
- Tinneveld, A., 1953: Primitieve Liemerse ijzerwinning. *De Liemers: Gedenkboek dr. J. H. van Heek*, 146-154. Didam.
- Tylecote, R.F., 1981: The medieval smith and his methods. In: D. W. Crossley (red.), *Medieval industry* (Council for British Archaeology, Research Report 40), 42-50. London.

21. Weisgerber, G., Roden, C., 1985: Römische Schmiedeszenen und ihre Gebläse. *Der Anschnitt* 37:1, 2-21.
- Young, T., 2003: Grey glassy, vesicular slags. *Bristol and Gloucestershire Archaeological Report* 2, 52-53.