



Delft University of Technology

Gebroken achtergelaten in het dal van de Aa. Een Zwitserse dolk in een Brabants beekdal

Theunissen, Liesbeth; van Os, Bertil; van Eijck, L.

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Metaaltijden

Citation (APA)

Theunissen, L., van Os, B., & van Eijck, L. (2024). Gebroken achtergelaten in het dal van de Aa. Een Zwitserse dolk in een Brabants beekdal. In P. van de Geer, A. Müller, M. D. R. Schurman, & N. de Vries (Eds.), *Metaaltijden: Bijdragen in de studie van de metaaltijden* (Vol. 11, pp. 83-98). Sidestone Press.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

METAALTIJDEN 11

BIJDRAGEN IN DE STUDIE VAN DE METAALTIJDEN



REDACTIE:

P. VAN DE GEER, A. MÜLLER, M.D.R. SCHURMANS & N. DE VRIES

STICHTING METAALTIJDENONDERZOEK NEDERLAND



This is a free offprint – as with all our publications the entire book is freely accessible on our website, and is available in print or as PDF e-book.

www.sidestone.com

METAALTIJDEN 11

BIJDRAGEN IN DE STUDIE VAN DE METAALTIJDEN

REDACTIE:

P. VAN DE GEER, A. MÜLLER,
M.D.R. SCHURMANS, N. DE VRIES

© 2024 Individuele auteurs

Uitgegeven door Sidestone Press, Leiden
www.sidestone.com

Vormgeving & omslagontwerp: Sidestone Press

Omslagafbeeldingen:

- Spiegel: Collectie Valkhof Museum (bruikleen Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed)
- Speerpunt: G. van Oortmerssen (Groningen Institute of Archaeology)
- Huisplattegronden: Archol / ADC Archeoprojecten (ADC Rapport 600 / Archol Rapport 738)
- Foto Mosterdveentje: Jos Stöver (erfgoedfoto.nl)

ISBN 978-94-6426-301-5 (softcover)

ISBN 978-94-6426-302-2 (hardcover)

ISBN 978-94-6426-303-9 (PDF e-book)

ISSN 2405-6782 (print) | 2590-1680 (online)

DOI: 10.59641/tt812wf



Contents

Voorbij Tiel en terug naar de basis: artefactstudies, nederzettingen- en landschapsonderzoek.	7
<i>Pepijn van de Geer, Axel Müller, Miel Schurmans & Nynke de Vries</i>	
Beyond Tiel and back to basics: artefact studies, settlement- and landscape studies	9
<i>Pepijn van de Geer, Axel Müller, Miel Schurmans & Nynke de Vries</i>	
A Tréboul type spearhead from Twisk	11
<i>Stijn Arnoldussen, Frans Ruiter, Hannie Steegstra, Jelte van der Laan, Bertil van Os & G. van Oortmerssen</i>	
Een hamerbijl van het type Muntendam uit Oeffelt (NL): hergebruik of intentionele depositie?	25
<i>Rik Semeijn</i>	
Midden-bronstijd huizen met opgehoogde vloeren in het Gelders rivierengebied. Geertjesgolf Westplas vindplaats 1, Winssen	35
<i>Judith van der Leije</i>	
Begraven langs de Maas: een bijzonder crematiegraf uit de bronstijd met glazen kralen	43
<i>Margriet Tump, Erik Drenth, Leo Tebbens, Mieke Tolboom, Bertil van Os, Luc Megens, Lars den Boef & Michiel Meurs</i>	
Een mes tussen de scherven. Een depositie in een kuil aan de Kloosterstraat te Simpelveld	57
<i>Roderick C.A. Geerts</i>	
Bloom, Salt and Handmills at the Cross Roads	63
<i>Norbert Reuther & Gerald Volker Grimm</i>	
Craftsmanship from afar. Two British La Tène bronzes from Nijmegen	73
<i>Michael den Hartog</i>	
Gebroken achtergelaten in het dal van de Aa. Een Zwitserse dolk in een Brabants beekdal	83
<i>Liesbeth Theunissen, Bertil van Os & Lambert van Eijck</i>	

Vierbeukige plattegronden in de Kempen – <i>the story continues</i>.	101
Resultaten van het syntheseonderzoek naar vierbeukige plattegronden in noordelijk Vlaanderen	
<i>Tina Dyselinck, Bart Lauwers & Diederik de Koning</i>	
Water and fire. Specific management of the dynamic Early Iron Age landscape of Valkenburg (South-Holland)	113
<i>Yvonne van Amerongen</i>	
River of Buried Metal	121
<i>Sabrina N. Autenrieth</i>	
<i>Living on the edge</i>. Laatprehistorische bewoning aan de voet van de Oost-Veluwe stuwwal nabij Hattemerbroek	129
<i>Sebastiaan Knippenberg, Femke Vermue & Axel Müller</i>	
Auteursgegevens	155

Gebroken achtergelaten in het dal van de Aa. Een Zwitserse dolk in een Brabants beekdal

Liesbeth Theunissen, Bertil van Os & Lambert van Eijck

Trefwoorden: dolk, midden-bronstijd, gefragmenteerd, Zwitserland, metaalsamenstelling, depositie

Keywords: dagger, Middle Bronze Age, fragmented, Switzerland, metal composition, deposition

Hoe het begon

Op dinsdag 28 september 2021 ontdekte Wim van Schaijk op een akkerperceel in het dal van de Aa bij Dinther een merkwaardig roestig stukje brons (afb. 1). Na wat schoonmaken werden parallelle lijnen op beide kanten zichtbaar en aan één uiteinde twee halfronde ‘inkepingen’, de overblijfselen van twee nietgaten. Het stukje brons bleek een fragment van een bronzen dolk te zijn.

Na ontdekking is het dolkfragment gemeld bij *Portable Antiquities of the Netherlands* (PAN, nummer 00098491) en als DB 3053 in de Groningse database van voorwerpen uit de bronstijd opgenomen. Het dolkonderdeel bleek een van de vele ontdekkingen die wij uit dit deel van Noord-Brabant kennen. Het lage landschap van de Aa en de Dommel, ten zuiden van 's-Hertogenbosch, mag een prehistorisch depositielandschap worden genoemd, met ruim vijftig gemelde objecten uit de periode van 2200 tot 800 voor Chr. Het gaat om vuurstenen en bronzen bijlen, zwaarden, veel speerpunten en een enkel sieraad die vooral in allerlei (voormalige) natte plekken zijn gevonden (afb. 2). Voor wat betreft het aandeel bronzen voorwerpen uit de bronstijd zijn er – tot nu toe – 43 geïnventariseerd.¹ Vooral in de randzones van het dal van de Aa wordt de laatste jaren veel gevonden. Dat komt onder andere omdat dit gebied favoriet is bij metaalzoekers.

Het dolkfragment is in het najaar van 2021 in bruikleen gegeven aan de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) voor nader onderzoek. Daarbij hadden

¹ Deze inventarisatie is uitgevoerd (en wordt geactualiseerd) door de eerste auteur.



Afbeelding 1. Het dolkfragment direct na ontdekking (foto: Wim van Schaijk).

Figure 1. The dagger fragment immediately after discovery (photo: Wim van Schaijk).

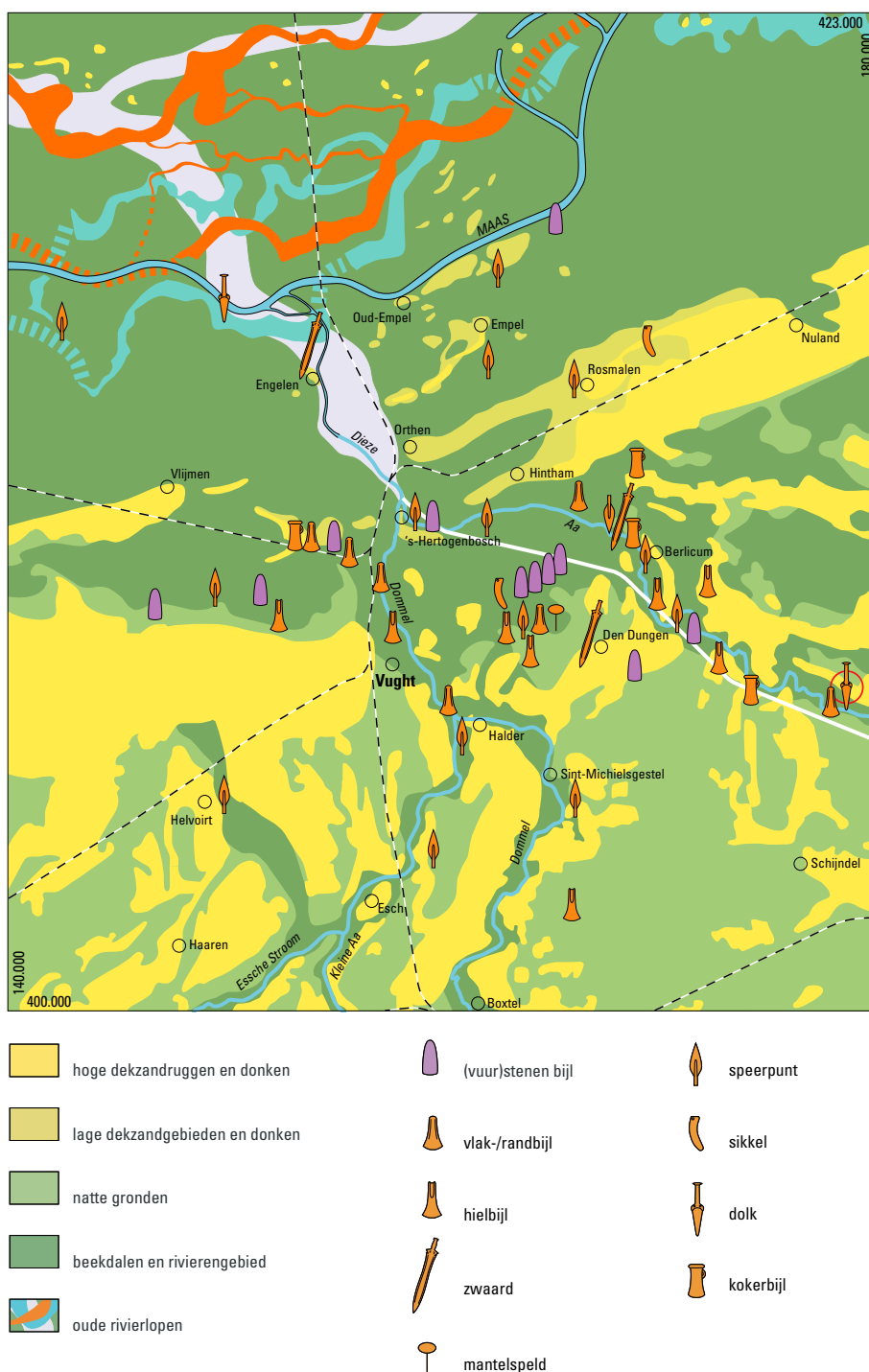
wij verschillende vragen. De belangrijkste waren: wat is het type dolk waartoe het fragment behoort, wanneer is het gemaakt en wat is de samenstelling van het brons? Wat betekent deze ontdekking in termen van menselijk handelen? Hoe kunnen we deze vondst het beste interpreteren?

Al met al heeft deze vragen-en-antwoordenronde drie jaar geduurd. Om de vraag naar de typologische duiding te kunnen beantwoorden, zijn verschillende experts bevroegd en publicaties geraadpleegd. Om meer te weten te komen over de bronsamenstelling zijn verschillende technieken, zowel non-destructief als licht-invasief, op verschillende momenten ingezet. Het voortschrijdende inzicht dat daarbij is opgedaan, is telkens weer benut. In januari 2022 is het oppervlak met pXRF in Amersfoort onderzocht en in het najaar is het fragment met neutronentomografie in Delft gemeten. Toen bleek dat de ijzercorrosie de XRF-metingen flink beïnvloedde, is het stuk in februari 2023 schoongemaakt, waarna het bronsoppervlak in maart van dat jaar opnieuw met een pXRF is gemeten. Tot slot is in januari 2024 een klein monster genomen, van het brons onder de patinalaag. Ook dat monster is met pXRF gemeten. Van dit geboorde bronsmonster is met inductief gekoppelde plasmamassaspectrometrie (IC-MPS) de samenstelling bepaald, maar ten tijde van het schrijven van dit artikel waren de resultaten hiervan nog niet bekend.

In deze bijdrage presenteren wij zowel de uitkomsten uit de methodisch verschillende toepassingen als uit de archeologisch, typologische benadering.

Het dolkfragment nader bekeken

Zoals afbeelding 1 laat zien is het fragment vrij klein en weegt slechts 10,2 gram. Het heeft een resterende lengte van 3,6 cm, een breedte van 3,1 cm (grootste maat), een dikte van 3,3 mm van het middendeel en 1,8 mm aan de zijkant. Aan het oppervlak zijn duidelijke roestvlekken en met ijzer verkit zand aanwezig. Beide zijden tonen twee banen van zes parallelle, gegoten ribbels die in het midden samenkomen. Het fragment is, waarschijnlijk



Afbeelding 2. Het rijke depositielandschap ten zuiden van 's-Hertogenbosch (RCE). De Dintserse dolk is met een rode cirkel aangegeven.

Figure 2. The intensively used depositional landscape south of 's-Hertogenbosch (RCE). The dagger of Dinther is indicated with a red circle.

al in de oudheid, nogal beschadigd. Aan de bovenzijde zijn twee halfronde inkepingen van de oorspronkelijke nietgaten met een doorsnede van ca. 6,5 mm, zichtbaar. De positie van deze twee nu nog zichtbare nietgaten geeft aan dat de dolk zeer waarschijnlijk oorspronkelijk voorzien was van drie nietgaten. Met name de breuk aan de onderzijde is vrij recht en de dolk lijkt daar oudtijds gebroken. De oorspronkelijk dunne, snijdende zijanten van het lemmet zijn niet meer aanwezig. Recente beschadigingen zijn niet zichtbaar. Alle breukvlakken zijn oud. Vanwege de vele beschadigingen aan de randen is het dan ook lastig om de originele lengte van deze dolk te reconstrueren. Het oogt vrij klein. Uitgaande van een oorspronkelijke breedte van 4-5 cm van het deel met de nietgaten, zou het kunnen gaan om een dolk met een lengte van 10-18 cm, als ruwe schatting.

Het dolkfragment nader geduid

Gelukkig gaat het om het bovendeel van de dolk met een karakteristieke lijnversiering. Dit maakt dat het voorwerp nader typologisch geduid kan worden. Bij de rondgang met de vraag 'Wie kent dit type versierde dolken' is dankbaar gebruik gemaakt van de grote kennis en ervaring van een aantal bronsijdexperts.

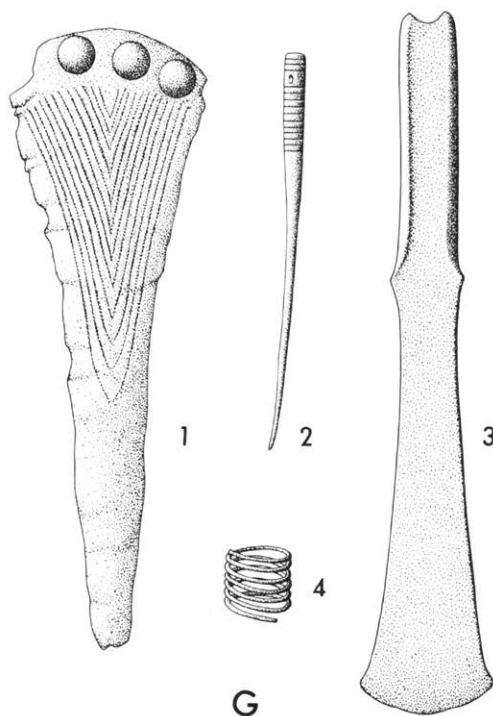
In eerste instantie werd gedacht aan een Engels type. De lijnversiering en de drie nietgaten doen denken aan een *Wessex grooved dagger*. Gerloff (1975) classificeert in haar overzichtswerk *The Early Bronze Age daggers in Great Britain* verschillende groepen dolken, waaronder de Camerton-Snowhill-serie van *Wessex daggers*, die gekenmerkt worden door drie nietgaten (Gerloff 1975, 99-100; Burgess & Gerloff 1981) en die grofweg in de periode 1600-1400 voor Chr. wordt geplaatst. In algemene zin gaat het om dolken voorzien van groeven, meestal gemaakt van tinbrons en veelal gegoten in een tweedelige mal. De dolken van de Camerton-Snowhill-groep hebben een boogvormig blad, in de vorm van een concave driehoek. Dit wordt *ogival-shaped* genoemd (in het Duits *geschweift*, dat wil zeggen boogvormig). Deze bladvorm is afwijkend van die van oudere dolken, die een meer langgerekte, driehoekige vorm hebben en bovendien voorzien zijn van een plat en geen bol lemmet. Zo hebben de dolken van het Camerton-Snowhill-type een centrale verdikking in het midden van het blad en dunne randen (Gerloff 1975, 99-100). De versiering bestaat uit drie tot vier gegoten lijnen, 'groeven', die de omtrek van het lemmet volgen.

Als we het dolkfragment uit Dinther naast deze Engelse types leggen, zijn er toch wat subtiele verschillen in de vormgeving te constateren. De Wessex-dolken hebben een veel bredere zone onder de klinknagels dan het Dintherse fragment. De groeven in de Wessex-dolken beginnen net onder de buitenste klinknagelgaten, bij het handvatdeel (gevestplaatdeel). Bij het Dintherse exemplaar beginnen de groeven direct bij de klinknagelgaten. Bovendien komen de groeven al vrij snel samen, op een paar centimeters onder de klinknagelgaten. Op de Engelse dolken komen die groeven pas samen op het onderste deel van het lemmet. Behalve het feit dat bij het Dintherse stuk de twee banden aan lijnversiering elkaar 'raken' en zelfs overlappen is er ook geen duidelijke gevestplaatdeel herkenbaar met daarin de nietgaten. Het plaatdeel lijkt zonder overgang door te lopen in het lemmet.

Een verdere zoektocht door de literatuur leverde een meer aannemelijke parallel op, namelijk met de groep *Kannelierte Griffplattendolche*, die Gallay (1981, 72-73 en Taf. 9,

Afbeelding 3. De dolk (1) en de andere bijgiften van de overledene, begraven in de grafheuvel in La Chapelle-sur-Fureuse (Jura). Dit exemplaar is de beste parallel voor de dolk van Dinther (bron: Gallay 1981, Taf. 49G).

Figure 3. The dagger (1) and the other grave gifts of the deceased, buried in the barrow of La Chapelle-sur-Fureuse (Jura). This specimen is the best parallel for the dagger of Dinther (from: Gallay 1981, Taf. 49G).



207-210) onderscheidt.² Dolken van deze groep ‘geribbelde dolken met een greepplaat’ zijn versierd met groeflijnen. Ze hebben een centrale verdikking in het midden en rechte bladen. De afmetingen en het aantal nieten (meestal vier tot zes) kunnen aanzienlijk variëren. Dit type komt voornamelijk voor in Zwitserland, maar kent ook een paar voorbeelden in het Franse Juragebergte (Gallay 1981-73). De beste parallel voor de Dintherse dolk vinden we ook daar: een dolk uit een graf, die samen met een randbijl, een versierde kledingspeld en gouden spiraal is gevonden (afb. 3). Het gaat om grafstukken bij een centraal begraven persoon in een grafheuvel bij La Chapelle-sur-Fureuse (Gallay 1981, 72, Taf. 9; Taf. 49G). Op basis van de versierde *Keulenkopfnadel* plaatst Gallay dit graf op de overgang van de vroege naar de midden-bronstijd, tussen 1700-1575 voor Chr. (Gallay 1981, 73).

We concluderen dat het dolkfragment een bijzondere vondst is. Uniek in Nederland, omdat we vooralsnog geen andere voorbeelden van dit type kennen. Het is aannemelijk dat dit Brabantse exemplaar een importstuk is, duidelijk verwant met voorwerpen uit Zwitserse contreien. Omstreeks 1600 voor Chr. is de dolk door uitwisseling – wellicht via de Rijn, Moezel en/of Belgische Maasvallei – uiteindelijk in het dal van de Aa terecht gekomen.

Metten is weten: pXRF

Om meer te weten over de samenstelling van het brons is het oppervlak van dolkfragment met een draagbare XRF gemeten. Röntgenfluorescentiespectrometrie (vanuit het Engels afgekort tot XRF) is een niet-destructieve techniek. Het basisprincipe is dat een anorganisch materiaalsoort (bijvoorbeeld klei, brons of glas) wordt blootgesteld aan röntgenstraling en vervolgens wordt de teruggezonden (fluorescente) straling gemeten. De fluorescente

² De auteurs zijn Hannie Steegstra (GIA) dankbaar voor deze suggestie.

straling heeft voor ieder element karakteristieke golflengtes en zo kan aan de hand van de intensiteit de samenstelling worden bepaald.

Voor de analyse is een Niton xl3t gold++ XRF gebruikt, in de meetmodus *electronic mode*, met een meettijd van 25 seconden. Het oppervlak van het dolkfragment is op acht locaties bestraald met röntgenstraling. Dit zijn puntmetingen met een zeer klein oppervlak en ook de indringingsdiepte is beperkt. Deze metingen zijn op twee momenten verricht. Eénmaal in het laboratorium van de rijksdienst (meetreeks 3483-3489) op 12 januari 2022 en nogmaals tijdens een PAN-evenement op 4 maart 2023 (meting 2475). Deze tweede meting is uitgevoerd op het dolkfragment nadat het oppervlak door een restaurator was schoongemaakt en behandeld (afb. 4). Bij de eerste meting was namelijk duidelijk geworden dat het dolkfragment omgeven was door een flinke ijzerkorst die de resultaten sterk beïnvloedde (tabel 1). Opvallend was dat de tweede meting nog steeds een hoge ijzerwaarde van bijna 40% opleverde. Dit ondanks het feit dat de ijzeroxidelaag door de metaalrestaurator zichtbaar was verwijderd. Daarnaast is het fragment op 10 januari 2024 bemonsterd voor metaalsamenstellingsonderzoek en stabiele loodisotopen.³ Met een 1 mm-boor is ca. 7 mg slijpsel verzameld, van het brons onder de patinalaag. Ook dit boorslijpsel is met de pXRF onderzocht.

De resultaten van de pXRF-metingen geven aan dat het oppervlak hoog in tin en laag in koper is. Die verhouding is ook bij de tweede meting vastgesteld, dus dat is vrij consistent. Ook de spoorelementen die zijn bepaald tijdens beide meetsessies, komen vrijwel overeen, behalve de waarde van lood die bij de tweede meting wat lager uitvalt. De geëxtrapoleerde tinwaarde komt uit op 33%, de bijbehorende koperwaarde op 65% bij een ijzerwaarde van 0% (afb 5).

De hoge ijzerwaarden geven aan dat de inwerking van het bodemmilieu op de samenstelling van het oppervlak aanzienlijk is. IJzer komt alleen voor in spoorhoeveelheden in brons en zelfs in brons gemaakt van ongezuiverd koper is het ijzergehalte lager dan 5% (Van Os *et al.* 2014). De bron van het ijzer is in dit geval dan ook het grondwater in de bodem. De bruine kleur van het dolkfragment wijst op de aanwezigheid van ijzerhydroxides (roest). Onder zure bodemomstandigheden, zoals in de bouwvoor van percelen langs de Aa, lost koper op in contact met aeroob grondwater, zeker als dit waterniveau fluctueert. Juist op dergelijke plekken oxideert ook gereduceerd ijzer uit het grondwater. De vorming van een ijzerhydroxidelaag op het voorwerp en het oplossen van koper uit het oppervlak is afhankelijk van de porositeit van de bodem, de stroming van het grondwater en de aanwezigheid van opgelost zuurstof. De neerslag van ijzerhydroxide vindt sneller plaats wanneer ook opgelost koper aanwezig is. Deze roest hecht zich bij voorkeur aan tin-oxide (cassiteriet, tinerts) oppervlaktes zoals die van een bronzen voorwerp of wapen, zoals bijlen, speerpunten of zwaarden/dolken (Davis & Murray 1977; Laitinen & Watkins 1975). Wanneer eenmaal roest is gevormd, werkt dit als een katalysator voor het ijzer uit het grondwater: er hecht zich steeds meer ijzer aan het voorwerp (Huisman *et al.* 2023).

Een bruine patina van ijzerroest is zeer gebruikelijk op bronzen objecten die gedeponneerd zijn onder natte, zuurstofrijke omstandigheden (Fontijn 2003, 40-41). Zo hebben de munten uit de Romeinse muntschat van Berlicum een vergelijkbaar oppervlak

3 De monsternamen zijn uitgevoerd in het kader van het RCE-project #Let'sHubNL dat is gericht op het achterhalen van de uitwisselingsnetwerken in Nederland.

Afbeelding 4. Het schoongemaakte dolkoppervlak (foto: Wim van Schaijk).

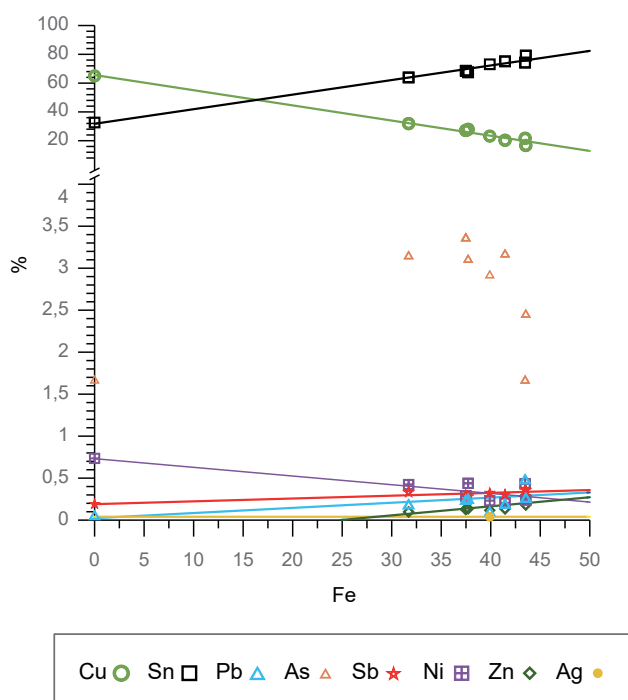
Figure 4. The cleaned dagger surface (photo: Wim van Schaijk).



Meetnr	Locatie	Koper (Cu)	Tin (Sn)	Lood (Pb)	Zink (Zn)	Arsen (As)	Zilver (Ag)	Antimoon (Sb)	Nikkel (Ni)	Bismut (Bi)	Mangaan (Mn)	Ijzer (Fe)
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
		27,1	68,5	0,25	0,13	3,36	<0,0	0,30	0,29	<0,0	<0,1	37,5
3483	voorzijde	27,9	67,5	0,26	0,14	3,10	<0,0	0,28	0,44	<0,0	0,10	37,7
3484	voorzijde	31,9	63,9	0,19	0,10	3,14	<0,0	0,33	0,42	<0,0	0,12	31,7
3485	voorzijde, rommelige zone	15,4	80,7	0,24	0,24	2,61	<0,0	0,36	0,22	<0,0	0,19	50,6
3486	achterzijde	20,3	75,1	0,20	0,13	3,17	<0,0	0,30	0,20	<0,0	<0,1	41,4
3487	achterzijde	21,7	74,3	0,49	0,28	1,66	<0,1	0,37	0,43	<0,0	0,21	43,5
3488	achterzijde (onderkant)	16,7	79,1	0,27	0,18	2,45	<0,0	0,36	0,24	<0,0	<0,1	43,5
3489	zijkant waar platina dunner lijkt	23	72,7	0,27	0,17	2,79	<0,0	0,33	0,32	<0,0		40,9
2475	-	23,2	73,1	0,11	0,12	2,92	0,04	0,32	0,23	0,01	-	39,9
Geëxtrapoleerd naar Fe=0, zie Afb 5		65	33	0,1	<0,1	1,7	<0,1	0,2	0,7	<0,05	<0,1	0

Tabel 1. De resultaten van de XRF-analyse.

Table 1. Elemental composition based on the XRF-results.



Afbeelding 5. Grafiek die de relatie weergeeft van het ijzergehalte (x-as) – dat op het oppervlak van de dolk is neergeslagen – met de elementen aanwezig in brons (uitgedrukt in gewichtspercentages). De waarde die de y-as snijdt bij een ijzergehalte van 0 is de beste benadering voor de bronsamenstelling. Het arseengehalte vertoont een divers beeld en lijkt niet af te hangen van de hoeveelheid ijzer omdat dit element ook in het grondwater aanwezig kan zijn. Daarom is er geen lineaire regressielijn voor arseen met ijzer getrokken, maar wordt de laagste arseen waarde als beste schatting gebruikt (RCE).

Figure 5. Graph showing the relationship between the iron content (x-axis) – deposited on the surface of the dagger – with the elements present in bronze (expressed in weight percentages). The value intersecting the y-axis at an iron content of 0 is the best approximation for the bronze composition. Arsenic shows an erratic picture and does not seem to depend on the amount of iron because this element can also be present in groundwater. Therefore, a linear regression line for arsenic with iron is not drawn, but the lowest arsenic value is used as the best estimate (RCE).

(Huisman *et al.* 2023). Door de dikke ijzerkorst geven de door extrapolatie verkregen koper- en tinwaarde slechts een indicatie van wat deze werkelijk kan zijn geweest (afb. 5).

In het algemeen wordt een hoog tinglehalte (in combinatie met een laag kopergehalte en een hoog ijzergehalte) geïnterpreteerd als een waarschuwing dat de metingen waarschijnlijk niet representatief zijn voor de samenstelling van het object (Arnoldussen *et al.* 2022, 5). Waarschijnlijk ligt het tinglehalte van de originele bronslegering (onder de ijzerkorst) tegen de 10% en het kopergehalte tegen de 90%, maar dit is een inschatting. Ook het gehalte arseen is niet met zekerheid vast te stellen. Arseen is ook van nature in grondwater aanwezig en bindt zich aan de ijzerhydroxides in de korst van het object.

Meten is weten: neutronentomografie

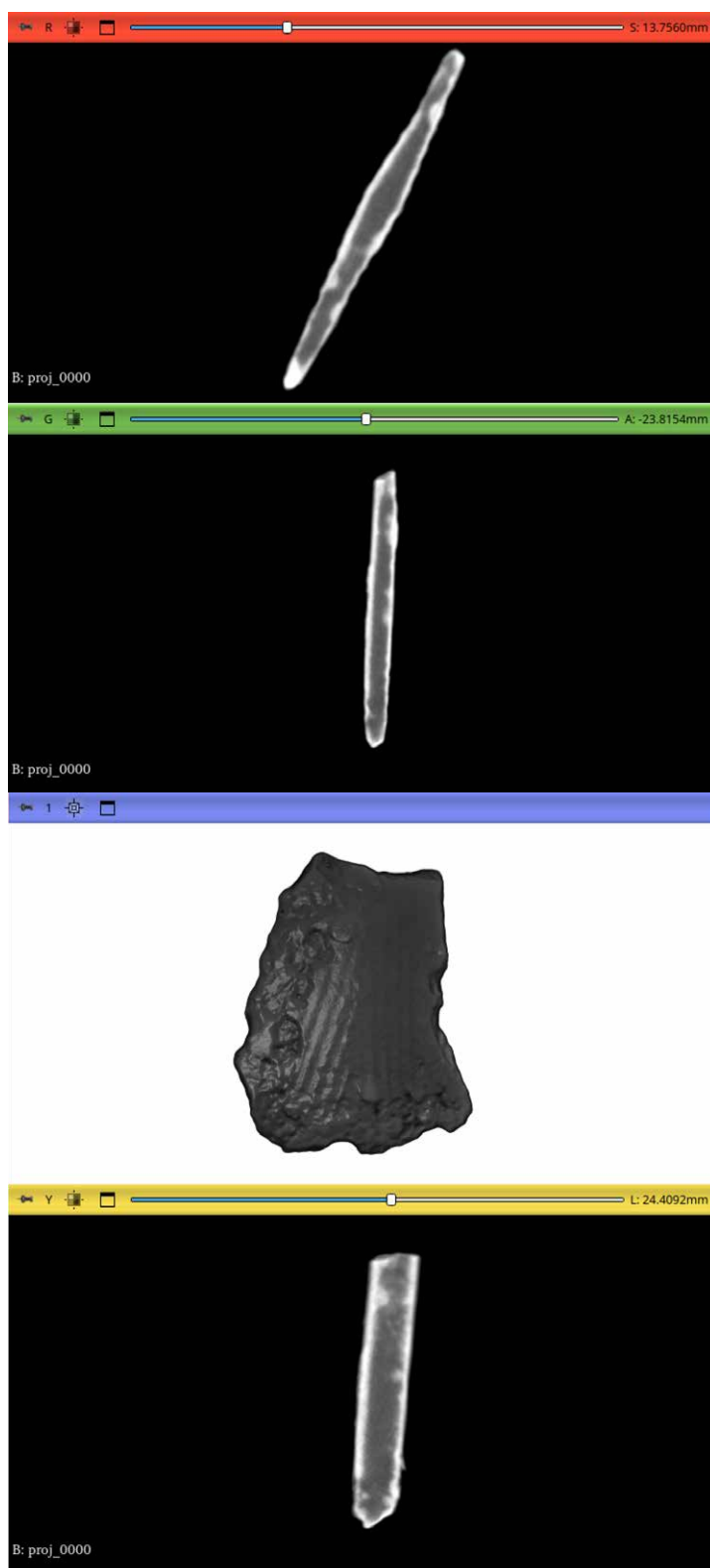
Om een betere indruk te krijgen van de metaalsamenstelling en de interne structuur van de Dintherse dolk is gekozen voor een andere benadering, namelijk de toepassing van neutronentomografie en gammaspectroscopie. Dat is uitgevoerd in september 2022, nog vóór de schoonmaakactie van het dolkfragment, aan de Technische Universiteit Delft. De nucleaire onderzoeksreactor van het TU Delft Reactor Instituut wordt onder andere gebruikt voor materiaalonderzoek, waarbij de reactor als neutronenbron fungeert. Het thermische neutronenbeeldvormingsstation FISH in Delft is sinds 2017 operationeel en wordt steeds vaker ingezet voor niet-destructief onderzoek van cultureel erfgoed in Nederland.

Met de bundellijn van FISH is van de dolk een CT-scan gemaakt waarmee de inwendige structuur in 3D kan worden geanalyseerd (Zhou *et al.* 2018). Anders dan bij conventionele CT-scans, wordt de dolk doorgelicht met neutronen in plaats van röntgenstraling. Omdat de interactie van neutronen met materie fundamenteel anders is dan die van röntgen, is het mogelijk om (massief) metalen objecten non-invasief door te lichten. Net als bij neutronenactiveringsanalyses is het daarnaast mogelijk om concentraties van elementen te bepalen uit de tijdelijke radioactiviteit die gegenereerd wordt tijdens de scan. Omdat de neutronen het gehele materiaal belichten, zal uit de gemeten radioactiviteit de samenstelling van het gehele object bepaald worden. Als het grootste deel van het volume van de dolk uit niet-gecorrodeerd metaal bestaat (brons), dan levert deze informatie dus inzicht in de samenstelling van voornamelijk de ongerepte, originele legering. De samenstelling wordt bepaald door (gamma-)spectroscopie te doen aan de radioactieve straling, waarbij elk geactiveerd atoom of isotoop straling uitzendt met zeer specifieke energie. Het principe van gammaspectroscopie is zeer vergelijkbaar met XRF, met als belangrijkste verschillen dat het een andere gevoeligheid heeft per element (en dus ook ongevoelig is voor bepaalde elementen) afhankelijk van in hoeverre een element geactiveerd kan worden, en dat het gewicht per element kwantitatief kan worden bepaald. Bij benadering is de fractie van atomen die geactiveerd worden tijdens een neutronen CT-scan typisch van de orde grootte van één biljoenste.

De inwendige structuur

Afbeelding 6 toont de 3D-reconstructie van de neutronen CT-scan, met drie doorsneden van de dolk. De corrosielaag tekent zich af als helder/wit omdat neutronen specifiek gevoelig zijn voor chemische elementen zoals waterstof en chloor. Deze zitten waarschijnlijk in de samenstelling van de corrosielaag. Het brons heeft een homogene grijswaarde, waarbij de gegoten ribbelversieringen vaag zijn te herkennen.

Uit het 3D-computermodel is het volume van het fragment softwarematig bepaald: dat is 2,13 cm³. De volgende stap is een onderscheid te maken in niet-gecorrodeerd en gecorrodeerd brons van het fragment. Daarvoor worden de grijswaarden in het gereconstrueerde volume ingedeeld in 'donkergrijs' en 'wit'. Het donkergrijs is het onaantaste brons, de witte buitenlaag is de corrosielaag, waarbij de grijswaarde die de grens tussen segmenten definieert. visueel wordt bepaald. Op deze manier kan het volume bepaald worden van een veronderstelde corrosielaag (0,87 cm³) en het inwendige, onaantaste brons (1,26 cm³). De dichtheid van de gecorrodeerde laag is moeilijk in te schatten, maar op basis van de tomografische beelden van het dolkfragment, wordt een dichtheid van 3 g/cm³ aangenomen.



Afbeelding 6. Drie doorsnedes van het dolkfragment, gegenereerd door neutronentomografie (beelden: TU Delft).

Figure 6. Three cross-sections of the dagger fragment, created by neutron tomography (images: TU Delft).

Segment	Voxel count (LM)	Volume (LM) [mm3]	Volume (LM) [cm3]	Voxel count (SV)	Volume (SV) [mm3]	Minimum	Maximum	Mean	Median	Surface area [mm2]	Volume (CS) [mm3]	Volume (CS) [cm3]
1 corrosion	4247437	854.712	0.854712	4247437	854.712	1.17759	2.01091	1.50749	1.51165	3166.09	854.496	0.854496
2 core	3734874	751.569	0.751569	3734874	751.569	0.707842	1.17759	0.956784	0.939873	1491.95	748.762	0.748762