

19. Untersuchungen zur Schmiedetechnik von Eisenobjekten aus dem Gräberfeld von Thunau, Obere Holzweise

Erich Nau, Mathias Mehofer

19.1 Einleitung

Im Rahmen der Aufarbeitung des frühmittelalterlichen Gräberfeldes von Thunau, Obere Holzweise, wurden drei frühmittelalterlich datierte Objekte an das VIAS (Vienna Institute for Archaeological Science) – Archäometallurgie zur Analyse übergeben. Es handelt sich dabei um die beiden Schwerter aus den Gräbern 129 und 130 (Inv. Nr. 36040 bzw. 36000) sowie um ein kleines Eisenmesser mit herzförmigem Griff aus Grab 86 (Inv. Nr. 34739). Ziel war die Klärung der Herstellungstechniken wie auch der Gebrauchsfähigkeit der Schwerter. Die daraus gewonnenen Ergebnisse sollten, neben den typologischen Merkmalen der Gegenstände, die Grundlage für die weitere archäologische Interpretation¹⁶⁴² bzw. Diskussion metallurgischer Aspekte der frühmittelalterlichen Eisentechnologie liefern.

19.2 Methode

Im Laufe dieser Untersuchung wurden die erwähnten Eisenobjekte hinsichtlich ihrer metallurgischen Charakteristika untersucht. Dabei waren folgende Eigenschaften des Materials von Interesse: chemische Zusammensetzung, Härte, Verunreinigungen, innerer Aufbau des Objektes und unterschiedliche Metallgefüge. In weiterer Folge wurde, basierend auf diesen Informationen, die Herstellungsgeschichte der Objekte rekonstruiert.

Vor Beginn der Arbeit wurden die bereits vorhandenen Röntgenaufnahmen der Eisenobjekte analysiert, um einen ersten Einblick in ihren Aufbau und ihren Erhaltungszustand zu bekommen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden die Probenentnahmestellen festgelegt. Dabei wurde darauf geachtet, einen möglichst vollständigen Querschnitt der Klinge zu erhalten, ohne den Materialzusammenhalt zu gefährden. Dies konnte durch die Entnahme von jeweils

zwei Proben pro Klinge erreicht werden, wobei der museale Wert der Objekte nicht beeinträchtigt wurde. Danach wurden die Probenstellen wieder entsprechend restauriert. Die Probenentnahme erfolgte mit einer Goldschmiedesäge, die gewonnenen Proben¹⁶⁴³ wurden danach in Epoxidharzgießlinge eingebettet und Querschliffe hergestellt.¹⁶⁴⁴ Das Polieren der Proben erfolgte mit 3 µm und 1 µm monokristalliner Diamantsuspension. Die Entwicklung des Primärgefüges¹⁶⁴⁵ erfolgte mit einer Ätzlösung nach Oberhoffer, die des Sekundärgefüges¹⁶⁴⁶ mit 3 %iger alkoholischer Salpetersäure im Tauchätzverfahren.¹⁶⁴⁷ Die Korngrößen wurden nach DIN 50 601, die Schlacken nach DIN 50 602 bestimmt. Als Vergleichsproben dienten Originale und experimentelle Stücke aus der Sammlung des VIAS der Universität Wien.¹⁶⁴⁸ Die Proben wurden unter einem Auflichtmikroskop im geätzten und ungeätzten Zustand untersucht und dokumentiert, die Härtemessungen an einem Vickers Kleinkraft Härteprüfgerät durchgeführt.

^{1643.} Zur Herstellung und Analyse von metallografischen Anschliffen vgl. SCHUMANN 1990, 80.

^{1644.} Aufgrund der sehr geringen Materialstärke wurde im Fall des Messers Inv. Nr. 34739 auf eine Probenentnahme verzichtet und stattdessen ein oberflächlicher Anschliff angefertigt. Um trotz der dadurch bedingten leicht konkaven Form der Anschlifffläche scharfe Aufnahmen zu erhalten, wurden diese im Rasterelektronenmikroskop anstatt im Auflichtmikroskop erstellt. Vgl. HOŠEK, ŠILHOVÁ 2006.

^{1645.} Sie zeigt mögliche Metalllagen, aus denen ein Werkstück zusammengeschweißt sein kann, und lässt den Legierungsgehalt, phosphorreiche oder phosphorarme Zonen der verschiedenen Eisenlagen erkennen. Vgl. PIASKOWSKI 1971, 156.

^{1646.} Das Sekundärgefüge besteht aus Ferrit, Perlit und Zementit und macht damit den Kohlenstoffgehalt und seine Verteilung sichtbar.

^{1647.} Zur Zusammensetzung und Anwendung der verschiedenen Ätzmittel vgl. SCHRADER 1957 und SCHRADER, ROSE 1989.

^{1648.} MEHOFER 2002.

^{1642.} SCHULTZ 1959. – PLEINER 1967. – PLEINER 1973. – SZAMEIT 1986. – SZAMEIT 1987. – WESTPHAL 1991. – SZAMEIT, MEHOFER 2002. – WESTPHAL 2002. – WESTPHAL 2004. – MEHOFER, LEUSCH, BÜHLER 2005. – MEHOFER 2007. – EICHERT, MEHOFER, BAIER 2011.

19.3 Metallografische Auswertung

19.3.1 Grab 130 – Schwert Inv. Nr. 36000

Das Schwert ist in einem relativ guten Zustand. An beiden Seiten der Klinge sind oberflächlich die Reste von Damast (vermutlich Furnierdamast) erkennbar. Aufgrund der vorangeschrittenen Korrosion ist der Damast nur in kleinen Bereichen erhalten bzw. erkennbar. Die noch vorhandenen Damastauflagen lassen ein Fischgrätenmuster im Bereich der Kehlung des Schwertes erkennen (Taf. 68/1). Die Röntgenaufnahmen der Klinge zeigen weitere Bereiche mit noch erhaltener Damasierung, die oberflächlich nicht mehr erkennbar sind.

Probe 1 – Klingemitte (Taf. 69, 70, 73)

Schlackeneinschlüsse: Zur Herstellung wurde Material mit geringem Schlackengehalt verwendet. Die größeren Einschlüsse sind überwiegend länglich eingestreckte Schlacken, die kleineren treten auch in globularer Form auf. Der Schlackengehalt entspricht den Schaubildern 6.1 bis 6.3 nach DIN 50 602. Lediglich im mittleren Bereich der Probe ist stellenweise ein höherer Schlackengehalt erkennbar, dieser entspricht in etwa Schaubild 6.7 bis 6.8 nach DIN 50 602.

Korngrößenbestimmung: Der untere Teil der Probe weist ein sehr feinkörniges Gefüge auf, es entspricht den Gefügebildern VII und VIII nach DIN 50 601. In der Probenmitte findet sich ein kleinerer Bereich mit deutlich größeren Korngrößen, sie entsprechen den Gefügebildern III bis IV nach DIN 50 601. Das Härtegefüge im oberen Bereich der Probe erlaubt keine Bestimmung der Korngröße.

Probe 2 – Klingenspitze (Taf. 71, 72, 74)

Schlackeneinschlüsse: Der Schlackengehalt ist über die gesamte Probe gering. Er entspricht den Schaubildern 6.1 bis 6.4 nach DIN 50 602. Es handelt sich großteils um zeilenförmig eingestreckte Schlacken.

Korngrößenbestimmung: Der untere Teil der Probe besteht aus sehr feinkörnigem Gefüge, entsprechend den Gefügebildern VII bis VIII.

19.3.1.1 Ätzung mit Nital

Die Kohlenstoffverteilung zeigt einen mehrteiligen Aufbau der Klinge. Im Bereich der Schneide (auf den Tafeln jeweils der untere Teil) ist Härtegefüge (Martensit und Bainit) sowie unvollständiges Härtegefüge vorhanden, das zur Klingemitte hin in ungehärtetes Gefüge übergeht. Auffallend ist das weniger gut entwickelte Härtegefüge in Probe 1 (Klingemitte).

Eine quer zur Längsachse der Probe verlaufende Schweißnaht zeigt, dass das Schneidenmaterial aus einem separaten Stück hergestellt und mittels Feuerschweißung

angeschweißt wurde. Im Bereich oberhalb dieser Schweißnaht liegt ferritisches bis ferritisch-perlitisches Gefüge vor. Entlang des Probenrandes lassen sich parallel zur Längsachse der Probe verlaufende Schweißnähte erkennen. Die durch diese Schweißnähte angeschweißten Teile (Furnierdamastlagen) sind aufgrund starker Korrosion nur noch zum Teil erhalten. Das Gefüge dieser beiden angeschweißten Oberflächenlagen unterscheidet sich deutlich vom Gefüge im Klingenkern. Es können Bereiche mit sowohl höherem als auch geringerem Kohlenstoffgehalt festgestellt werden. Innerhalb der angeschweißten Bereiche lassen sich weitere diagonal zur Längsachse verlaufende Schweißnähte feststellen.

19.3.1.2 Ätzung nach Oberhoffer

Im Anschliff lassen sich wie bereits erwähnt eine an den Klingenkern angeschweißte Schneide sowie zwei Furnierdamastlagen erkennen. Der Klingenkern sowie die angesetzte Schneide zeigen einen zonalen Aufbau, welcher vermutlich von einem Homogenisierungsprozess¹⁶⁴⁹ der Lupe stammt. Beide Proben weisen insgesamt jedoch eine homogene Verteilung von Legierungselementen auf. Die beiden an den Rändern angesetzten Metalllagen (Damast) lassen sich deutlicher als nach der Ätzung mit Nital erkennen. Innerhalb dieser angeschweißten Lagen lassen sich weitere diagonal zur Längsachse verlaufende Schweißnähte erkennen, die als Reste des Furnierdamastes gedeutet werden können.

19.3.1.3 Auswertung und Interpretation

Für die Produktion der Schwertklinge wurden sechs einzelne Metallstäbe verwendet (das Kernmaterial, zwei Torsionsdamaststäbe pro Seite und das Klingenmaterial).¹⁶⁵⁰ Für den Klingenkern wurde dabei Material mit relativ geringem Kohlenstoffgehalt verwendet, dies machte ihn elastisch. In einem weiteren Schritt wurden an diesen Klingenkern auf jeder Seite jeweils zwei Metalllagen mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt angeschweißt. Diese beiden Lagen sind als Furnierdamast anzusprechen. Die angeschweißten Damastlagen lassen sich zum Teil sehr deutlich im Schliffbild unterscheiden, vermutlich wurde für das Rohmaterial des Furnierdamasts eine andere Erzquelle als für den Klingenkern verwendet. Die in den Damastlagen diagonal zur Längsachse verlaufenden Schweißnähte sind als Hinweise auf eine vorangegangene Torsion der Damaststäbe zu interpretieren.

Die Ergebnisse der Härtemessung lassen ebenfalls einen Unterschied zwischen dem Material des Klingenkerns und

^{1649.} HERDITS 2000.

^{1650.} Vgl. mehrteiliger Klingenaufbau von Schwertern mit Furnierdamast bei: KOŠTA, HOŠEK 2008, 35.

dem des Furnierdamasts erkennen (Taf. 71/B). Im nächsten Schritt wurde Material mit hohem Kohlenstoffgehalt (über 0,3 %) an beiden Seiten an den Klingenkörper als Schneide angeschweißt. Die von diesem Herstellungsschritt noch zeugende Schweißnaht, die über den Damast hinausläuft, zeigt diese Reihenfolge deutlich an. Das Werkstück konnte nach dem Anschweißen der Schneiden fertig ausgeschmiedet werden und wurde im letzten Schritt gehärtet, wie anhand des Härtegefüges (Martensit) erkennbar ist. Vermutlich wurde das fertige Werkstück nach dem Härten noch angelassen,¹⁶⁵¹ da die ursprünglich nadelige Struktur des Martensits nur in wenigen Bereichen vorkommt.

Auffallend sind außerdem die Unterschiede der gemessenen Härtewerte zwischen der Probe nahe der Klingenspitze (Probe 2) und jener in der Klingennitte (Probe 1). Die Schneide der Probe 1 zeigt ein weniger ausgeprägtes Härtegefüge, zum Teil sind Perlitinseln vorhanden und die gemessenen Härtewerte liegen unter denen an der Klingenspitze. Das Schwert wurde also nicht vollständig bis an den Klingensatz gehärtet. Ziel dieser Behandlung war, die Klinge in der Mitte elastisch zu halten und nur dort, wo eine hohe Härte und Schneidhaltigkeit gefragt war, diese auch entsprechend zu härten. Diese Herstellungstechnik konnte an römischen Schwertklingen¹⁶⁵² beschrieben werden.

19.3.2 Grab 129 – Schwert Inv. Nr. 36040

Die Klinge ist teilweise stark korrodiert und weist bereits zahlreiche Fehlstellen auf. Holzreste haften an beiden Seiten der Klinge. Eine durch Korrosion geöffnete Schweißnaht an der Klingenspitze kann als Hinweis auf einen mehrteiligen Aufbau der Klinge gesehen werden (Taf. 68/B).

Probe 1 – Klingennitte (Taf. 75, 76, 79)

Schlackeneinschlüsse: Es wurde Material mit geringem Schlackengehalt verwendet. Großteils handelt es sich um länglich eingestreckte Schlacken. Innerhalb der größeren Schlackeneinschlüsse sind die typischen Phasen (Wüstit und Fayalit in einer glasigen Matrix) einer Rennfeuerschlacke zu erkennen (Taf. 79/5). Der überwiegende Teil der Probe weist einen Schlackengehalt nach Vergleichsbild 7.1 bis 7.3 nach DIN 50 602 auf, lediglich in kleineren Bereichen der Probe ist der Schlackengehalt wesentlich höher, entsprechend Vergleichsbild 4.7 und 7.7 nach DIN 50 602.

Korngrößenbestimmung: Die Korngröße im unteren Bereich der Probe entspricht den Gefügebildern V bis VII nach DIN 50 601, einzelne kleinere Bereiche mit auffällig

größeren Korngrößen, entsprechend Gefügebild IV nach DIN 50 601, sind vorhanden. Der obere Bereich der Probe besitzt durchwegs kleinere Korngrößen, entsprechend den Gefügebildern VII und VIII nach DIN 50 601.

Probe 2, Klingenspitze (Taf. 77, 78, 80)

Schlackeneinschlüsse: Die Probe zeichnet sich durch sehr geringen Schlackengehalt aus (Schaubild 7.0 bis 7.2 nach DIN 50 602), lediglich in der Probenmitte ist ein Bereich mit höherem Schlackengehalt vorhanden; dies entspricht Schaubild 7.4 nach DIN 50 602.

Korngrößenbestimmung: Im unteren Bereich der Probe sind Korngrößen entsprechend den Gefügebildern V bis VII nach DIN 50 601 vorhanden. Der obere Teil der Probe weist kleinere Korngrößen, die etwa den Gefügebildern VII und VIII nach DIN 50 601 entsprechen, auf.

19.3.2.1 Ätzung mit Nital

Die Kohlenstoffverteilung zeigt einen dreiteiligen Aufbau der Klinge. Im Klingenkern liegt ferritisches bis ferritisch-perlitisches Gefüge vor. Der Schneidenbereich besteht aus martensitischem Gefüge (Härtegefüge). Zwischen diesen beiden Bereichen lässt sich ein kontinuierlich verlaufender Anstieg des Kohlenstoffgehaltes (Taf. 79/2) beobachten. In beiden Proben gibt es eine deutliche, parallel zur Längsachse verlaufende Schweißnaht. Bei Probe 1 lässt sich die Schweißnaht nur bis zum Beginn des gehärteten Bereiches erkennen, eine weitere Schweißnaht befindet sich an der gegenüberliegenden Seite der Probe. Der hier angeschweißte Teil ist aufgrund starker Korrosion nur in einem kleinen Bereich erhalten. In Probe 2 lässt sich die Schweißnaht über die gesamte Länge bis zur Schneide hin erkennen. Links der Schweißnaht liegt ferritisch-perlitisches Gefüge vor, auf der rechten Seite ist bereits Härtegefüge zu erkennen. Im rechten Randbereich dieser Probe befindet sich eine weitere Schweißnaht, wobei nur kleine Teile des angeschweißten Materials erhalten sind. Im linken oberen Bereich von Probe 2 ist eine quer zur Längsachse verlaufende Schweißnaht erkennbar.

19.3.2.2 Ätzung nach Oberhoffer

Anhand der Ätzung nach Oberhoffer lässt sich in beiden Proben ein schwach ausgeprägter zonaler Aufbau erkennen. Insgesamt kann jedoch von einem sehr homogenen Aufbau der Klinge gesprochen werden. Lediglich der angeschweißte Teil im rechten Randbereich von Probe 2 zeigt einen deutlich anderen Anteil an Legierungselementen; innerhalb dieses angeschweißten Bereiches findet sich eine diagonal verlaufende Schweißnaht.

^{1651.} Darunter versteht man das Erhitzen auf etwa 200 °C über einen längeren Zeitraum, um Spannungen im Material, die durch das Härten entstehen, wieder abzubauen. – Vgl. BEITZ, KÜTTNER 1990, 34.

^{1652.} SCHULTZ 1959.

19.3.2.3 Auswertung und Interpretation

Die Ergebnisse der metallografischen Untersuchung zeigen einen sehr ungewöhnlichen mehrteiligen Aufbau der Klinge und erlauben verschiedene Möglichkeiten der schiedetechnischen Interpretation. Für den Klingenkern wurde Eisen mit relativ geringem Kohlenstoffgehalt verwendet. Der für die Härtung im Schneidenbereich notwendige hohe Kohlenstoffgehalt wurde durch einen Aufkohlungsprozess erreicht. Dies ist am kontinuierlich verlaufenden Anstieg des Kohlenstoffgehaltes deutlich erkennbar. Die in beiden Proben sehr klar erkennbare Schweißnaht im Bereich der Klingemitte stammt wohl vom letzten Homogenisierungsschritt des Rohmaterials, wenngleich auch nicht definitiv ausgeschlossen werden kann, dass es sich bereits um angeschweißten Furnierdamast handelt. Diese letzte Faltung des Rohmaterials hat noch vor dem Aufkohlen stattgefunden, der geringere Kohlenstoffgehalt links der Schweißnaht an der Klingenspitze ist wohl durch Entkohlung während des Schmiedens des Schwertes entstanden.

Die weiteren erkennbaren Schweißnähte können jedoch als Zeichen für Furnierdamast gewertet werden. Die verbliebenen Teile des Damastes finden sich nur auf einer Seite der Klinge. Möglich erscheint eine nur einseitige Damasizierung der Klinge, jedoch kann aufgrund der starken Korrosion nicht ausgeschlossen werden, dass die Damasizierung ehemals auf beiden Seiten vorhanden war. Über die Anzahl der aufgetragenen Damaststäbe kann keine Aussage getroffen werden. An der erhaltenen Oberfläche der Klinge sind keinerlei Spuren des Furnierdamastes erkennbar.

In einem letzten Arbeitsschritt wurde die Klinge gehärtet. Die relativ hohen Werte der Härtemessung zwischen 560 und 705 HV sprechen für eine optimal ausgeführte Härtung und dementsprechend gute Gebrauchseigenschaften der Klinge.

19.3.3 Grab 86 – Messer Inv. Nr. 34739 (Taf. 81)

Das Messer ist vollständig und in einem guten Zustand erhalten, was besonders deutlich an den beiden feinen, herzförmig eingerollten Enden des Griffes zu erkennen ist. Im Schneidenbereich des Messers sind an wenigen Stellen Fehlstellen bzw. Korrosion feststellbar. Aufgrund des Erhaltungszustandes wurde die Klinge nur oberflächlich im vorderen Klingendrittel angeschliffen (Taf. 81/1).

Schlackeneinschlüsse: Es wurde Material mit sehr geringem Schlackengehalt verwendet, Einschlüsse von überwiegend globularen Schlacken sind jedoch vorhanden.

Korngrößenbestimmung: Auf eine Bestimmung des Schlackengehaltes nach DIN-Norm wurde verzichtet, da aufgrund des oberflächlichen Anschliffes auch Korrosionsreste vorhanden sind, die das Ergebnis verfälschen würden.

19.3.3.1 Ätzung mit Nital

Der Anschliff weist über die gesamte angeschliffene Fläche ein gleichmäßig verteiltes Mikrogefüge auf. Es besteht durchgehend aus nadeligem Martensit (Härtegefüge). Die gemessenen Härtewerte liegen zwischen 450 und 550 HV.¹⁶⁵³

19.3.3.2 Auswertung und Interpretation

Das Rohmaterial für die Klinge wurde vom Schmied sorgfältig ausgewählt. Die Ergebnisse der metallografischen Untersuchung zeigen, dass ein einzelnes, hochwertiges Metallstück zur Herstellung dieses Messers verwendet wurde. Ein mehrteiliger Aufbau erscheint auch aufgrund der geringen Materialstärke als unwahrscheinlich. Das verwendete Material weist einen hohen Kohlenstoffgehalt und einen geringen Schlackenanteil auf. Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse der metallografischen Untersuchung streng genommen nur für den Bereich der untersuchten Probe gelten. Der hohe Kohlenstoffgehalt war notwendig, um – als letzten Arbeitsschritt des Herstellungsprozesses – eine Härtung der Klinge durchführen zu können.

Abschließend kann festgestellt werden, dass aufgrund der Qualität des Rohstoffes und der Herstellungstechnik von einem Messer mit sehr guter Qualität gesprochen werden kann. Eine Verwendung als chirurgisches Gerät erscheint durchaus möglich.¹⁶⁵⁴

19.4 Literaturverzeichnis

BEITZ, KÜTTNER 1990

W. BEITZ, K.-H. KÜTTNER (Hrsg.), Taschenbuch für den Maschinenbau (17. Auflage). Berlin 1990, 34.

EICHERT, MEHOFER, BAIER 2011

S. EICHERT, M. MEHOFER, R. BAIER, Archäologische und archäometallurgische Untersuchungen an einer karolingerzeitlichen Flügellanzenspitze aus dem Längsee in Kärnten/Österreich, Archäologisches Korrespondenzblatt 41/1, 2011, 139–154.

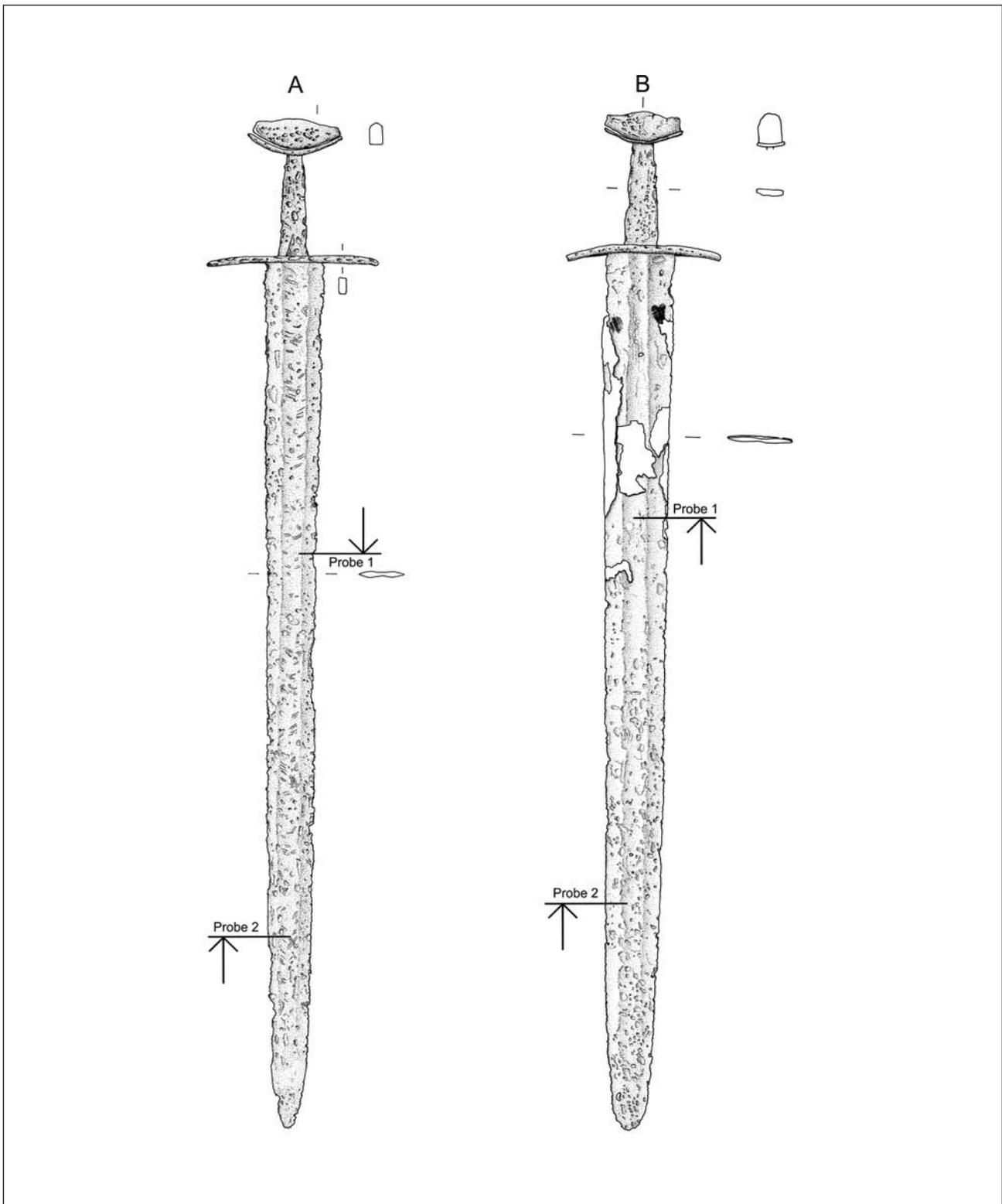
HERDITS 2000

H. HERDITS, Schweißisen – seine Herstellung, Bearbeitung und Veredelung im archäologischen Experiment. In: H. FRIESINGER, K. PIETA, J. RAJTÁR (Hrsg.), Metallgewinnung und Verarbeitung in der Antike (Schwerpunkt Eisen). Archaeologica Slovaca Monographiae, Commu-

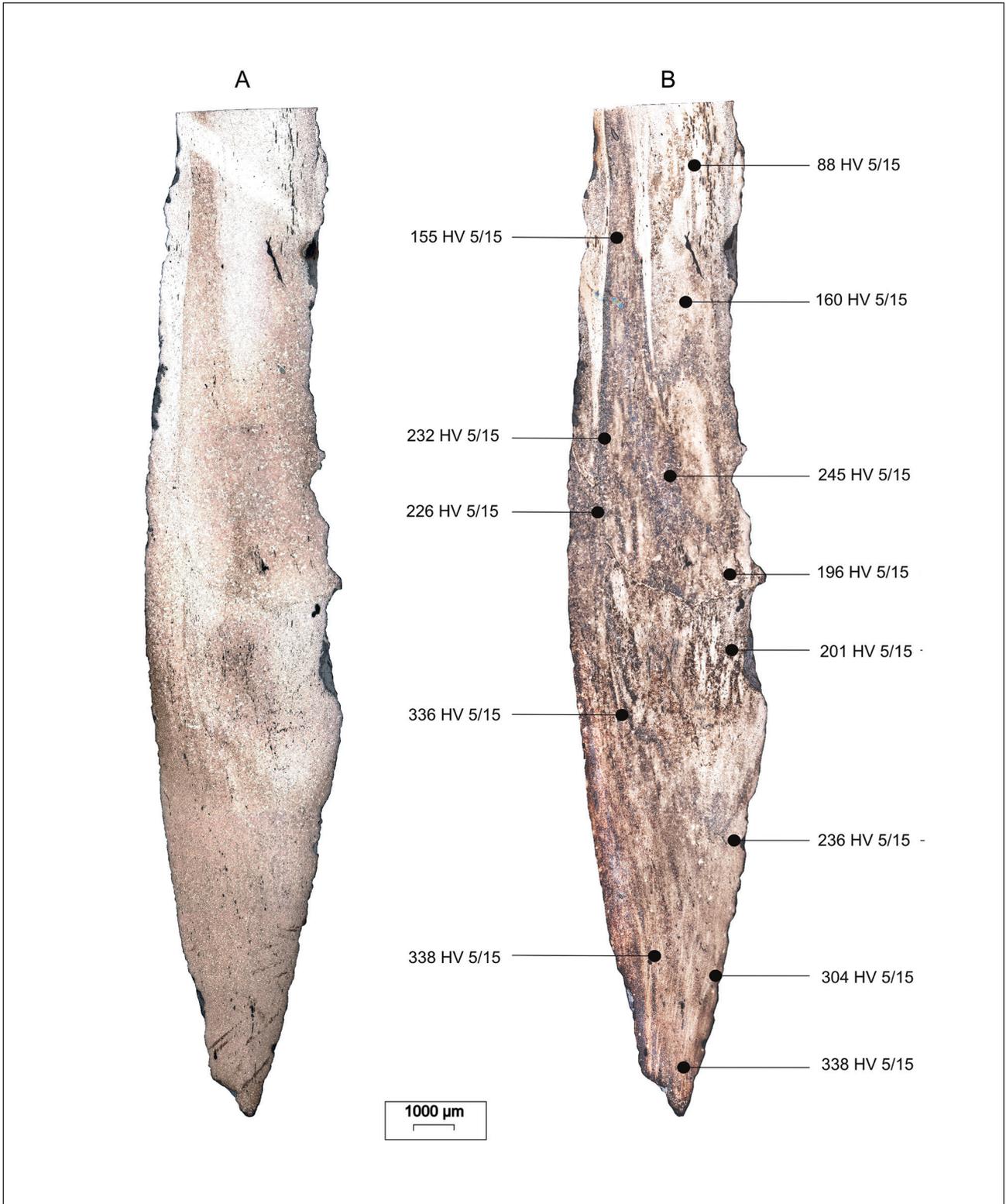
^{1653.} Die Härtemessung wurde mit einem Vickers Härteprüfgerät durchgeführt. Der Toleranzbereich dieses Verfahrens liegt bei +/- 27 HV bei Messung von Proben in Epoxidharzgießlingen. Da im Fall des Messers Inv. Nr. 34739 die Messungen jedoch an der Oberfläche des Objektes durchgeführt wurden, ist dieser Toleranzbereich etwas höher anzusetzen und nicht exakt zu definieren.

^{1654.} Vgl. HOŠEK et al. 2007, 932–937.

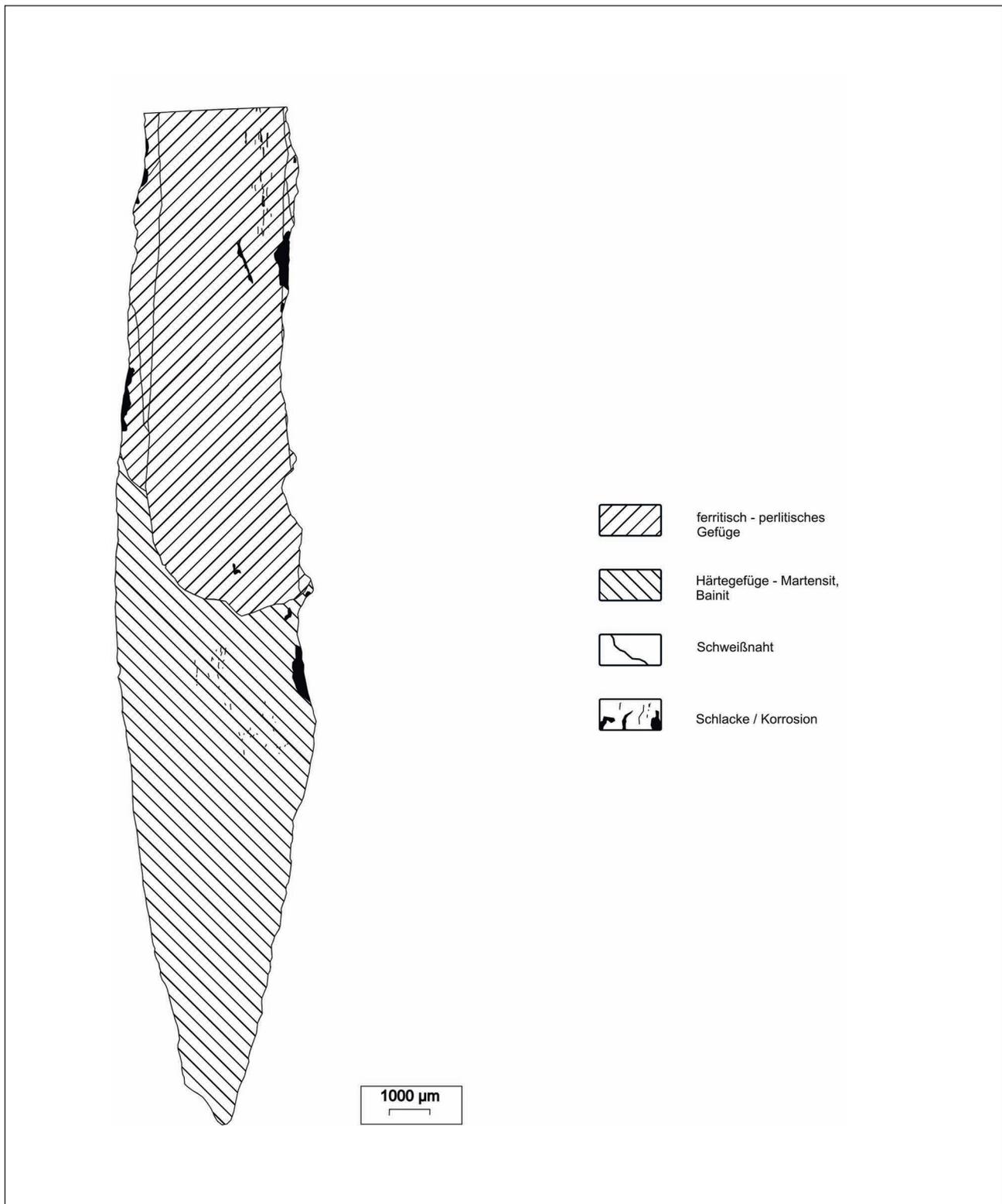
- nicationes Instituti Archaeologici Nitriensis Academiae Scientiarum Slovacae 3, Spiry Archeologického ústavu Akademie ved České Republiky v Brně 9, Brno – Nitra 2000, 66.
- HOŠEK, ŠILHOVÁ 2006
- J. HOŠEK, A. ŠILHOVÁ, Metalograficko-restaurátorské průzkumy rané středověkých nožů, *Archaeologické rozhledy* 58, 2006, 59–75.
- HOŠEK et al. 2007
- J. HOŠEK, N. PROFANTOVÁ, A. ŠILHOVÁ, E. OTTENWELTER, Bohemian so-called surgical early medieval knives, *Acta Metallurgica Slovaca* 13, 2007, 932–937.
- KOŠTA, HOŠEK 2008
- J. KOŠTA, J. HOŠEK, Zbraně z knížecího hrobu z 9. století v Kolíně z pohledu archeologie a metalografie [Weapons from the 9th century princely grave in Kolín from the point of view of archaeology and metallography], *Acta militaria mediaevalia* 4, 2008, 7–37.
- MEHOFER 2002
- M. MEHOFER, Frühgeschichtliche Schmiedegräber in Mitteleuropa, Unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Wien 2002.
- MEHOFER, LEUSCH, BÜHLER 2005
- M. MEHOFER, V. LEUSCH, B. BÜHLER, Die Schmiedetechnik der „Heiligen Lanze“. In: F. KIRCHWEGER (Hrsg.), *Die Heilige Lanze in Wien. Schriften des Kunsthistorischen Museums* 9, Wien – Mailand 2005, 168–189.
- MEHOFER 2007
- M. MEHOFER, Technologische Analysen an der Spatha von Hohenberg, Steiermark, *Archaeologia Austriaca* 89, 2007, 251–254.
- PIASKOWSKI 1971
- J. PIASKOWSKI, Über die Kennzeichen der Zementation und des Schweißens an den frühmittelalterlichen eisernen Gegenständen (Diskussion mit R. Pleiner), *Acta Archaeologica Carpathica* 12, 1971, 156.
- PLEINER 1967
- R. PLEINER, Die Technologie des Schmiedes in der Großmährischen Kultur, *Slovenska Archaeologia* 15/1, 1967, 77–188.
- PLEINER 1973
- R. PLEINER, Eisenschmiede im frühmittelalterlichen Zentraleuropa. Die Wege zur Erforschung eines Handwerkszweiges. *Frühmittelalterliche Studien* 9, Berlin 1973, 79–93.
- SCHRADER 1957
- A. SCHRADER, Ätzheft zur Schliffherstellung und Gefügeentwicklung für die Metallographie (4. Auflage). Berlin 1957.
- SCHRADER, ROSE 1989
- A. SCHRADER, A. ROSE, Gefüge der Stähle. *De Ferri Metallographia II/Neuaufgabe*. Düsseldorf 1989.
- SCHULTZ 1959
- E. H. SCHULTZ, Über die metallkundlichen Untersuchungen einiger römischer Schwertklingen, *Technische Beiträge zur Archäologie I*, 1959, 46–64.
- SZAMEIT 1986
- E. SZAMEIT, Karolingerzeitliche Waffenfunde aus Österreich. Teil I: Die Schwerter, *Archaeologia Austriaca* 70, 1986, 385–411.
- SZAMEIT 1987
- E. SZAMEIT, Karolingerzeitliche Waffenfunde aus Österreich. Teil II. Die Saxe und Lanzen spitzen, *Archaeologia Austriaca* 71, 1987, 155–171.
- SZAMEIT, MEHOFER 2002
- E. SZAMEIT, M. MEHOFER, Technologische Untersuchungen an Waffen des Frühmittelalters aus Oberösterreich, *Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereins* 147/1, 2002, 127–169.
- SCHUMANN 1990
- H. SCHUMANN, *Metallographie* (13. Auflage). Stuttgart 1990.
- WESTPHAL 1991
- H. WESTPHAL, Untersuchungen zu Saxklingen des sächsischen Stammesgebietes: Schmiedetechnik, Typologie, Dekoration. *Studien zur Sachsenforschung* 7, Oldenburg 1991, 271–365.
- WESTPHAL 2002
- H. WESTPHAL, Franken oder Sachsen: Untersuchungen an frühmittelalterlichen Waffen. *Studien zur Sachsenforschung* 14, Oldenburg 2002.
- WESTPHAL 2004
- H. WESTPHAL, Zur Entwicklung mittelalterlicher Waffen. In: W. MELZER (Hrsg.), *Schmiedehandwerk in Mittelalter und Neuzeit. Beiträge des 6. Kolloquiums des Arbeitskreises zur archäologischen Erforschung des mittelalterlichen Handwerks*. *Soester Beiträge zur Archäologie* 5, Soest 2004, 47–62.



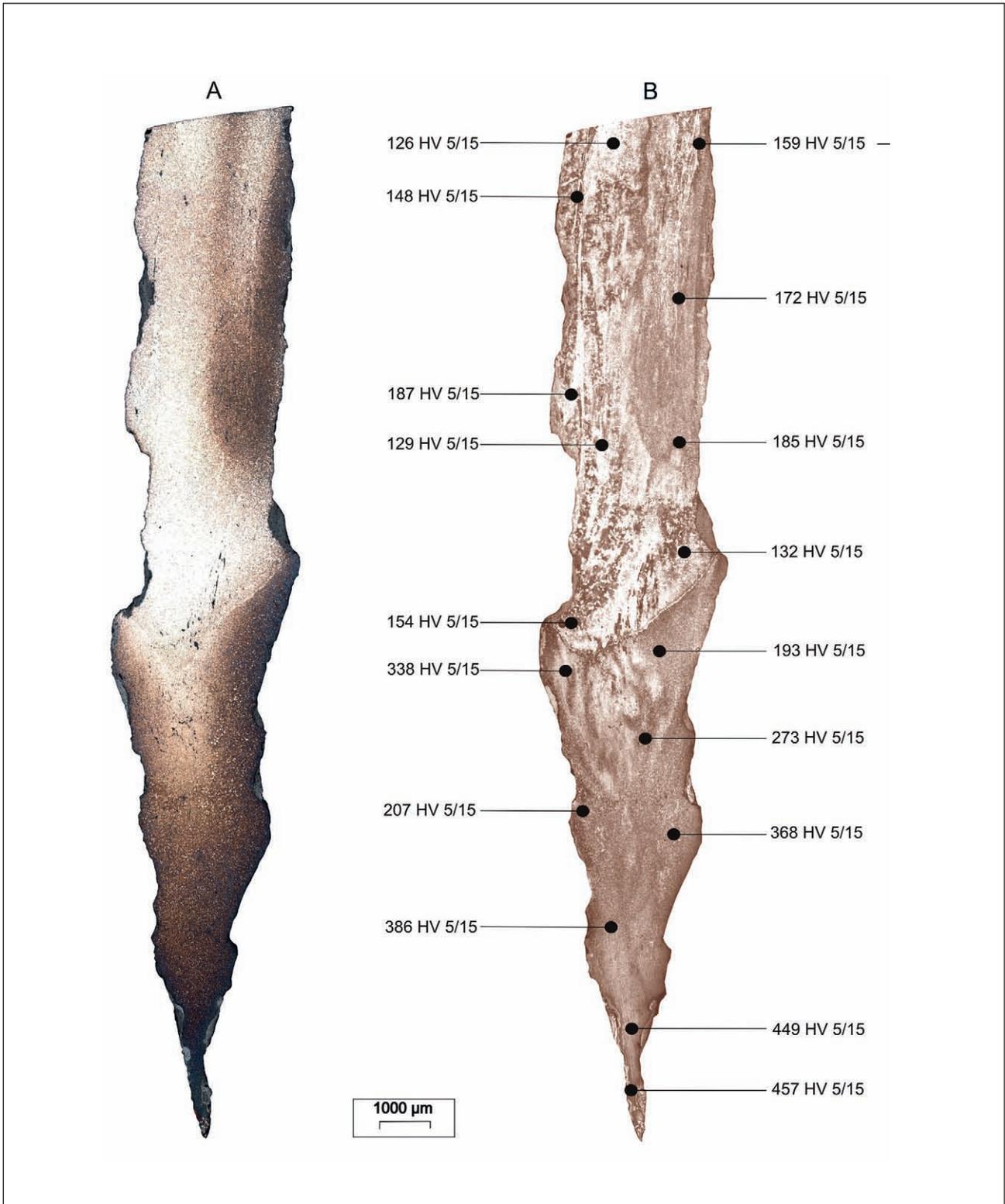
Taf. 68. Thunau, Obere Holzweise, Schwerter, A: Inv. Nr. 36000, B: Inv. Nr. 36040, Probenentnahmestellen, die Pfeile markieren die Sichtebene im Schliffbild (Grafik: B. Lethmayer, Institut für Urgeschichte und Historische Archäologie, Universität Wien).



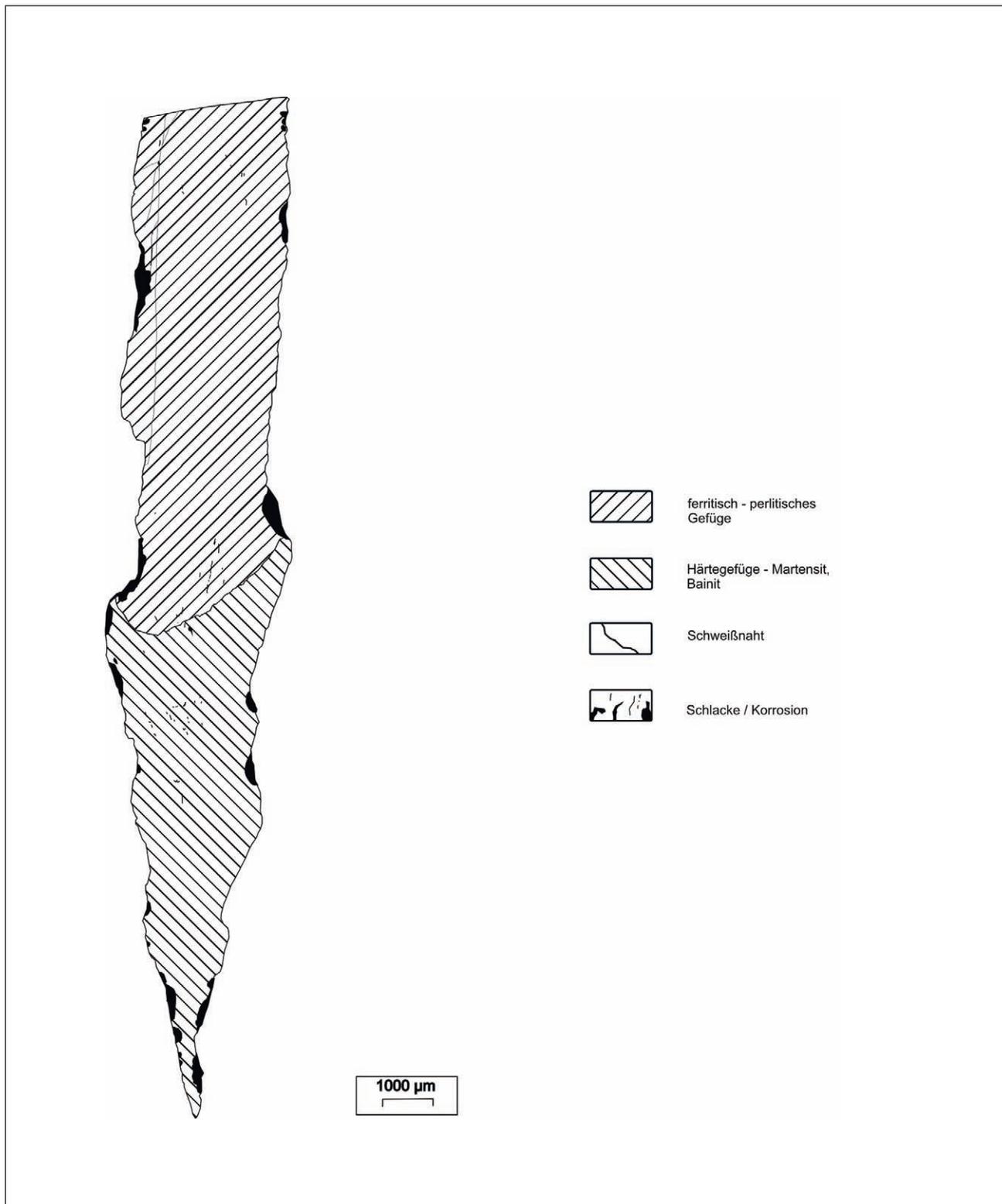
Taf. 69. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36000, Gesamtansicht Probe 1, Klinge mitte: A – Ätzung mit Nital, B – Ätzung nach Oberhoffer, Härtemessung nach Vickers (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



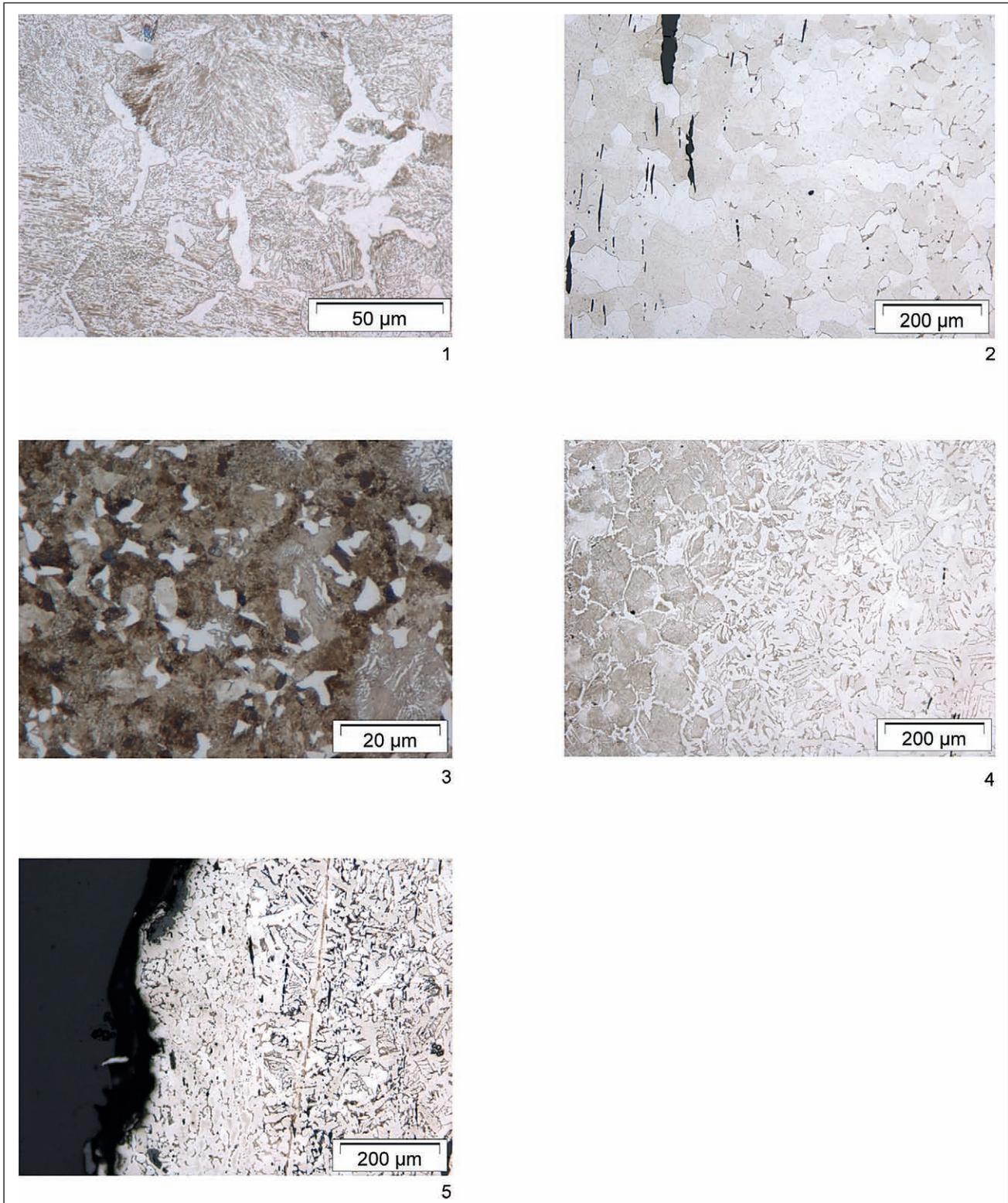
Taf. 70. Thunau, Obere Holzwiese, Schwert Inv. Nr. 36000, Probe 1, Klingenmitte: schematische Darstellung des Querschliffes (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



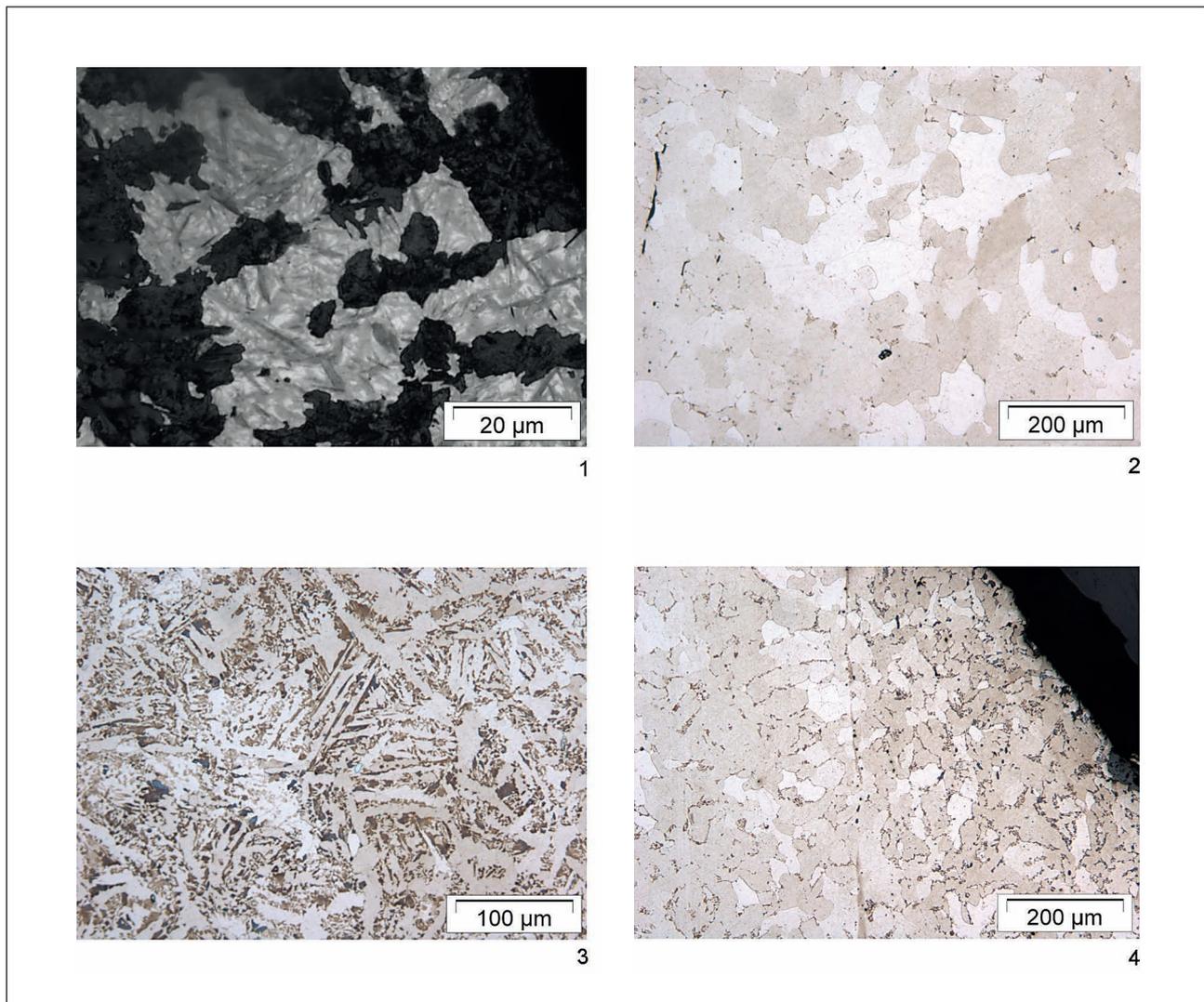
Taf. 71. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36000, Gesamtansicht Probe 2, Klingenspitze: A – Ätzung mit Nital, B – Ätzung nach Oberhoffer, Härtemessung nach Vickers (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



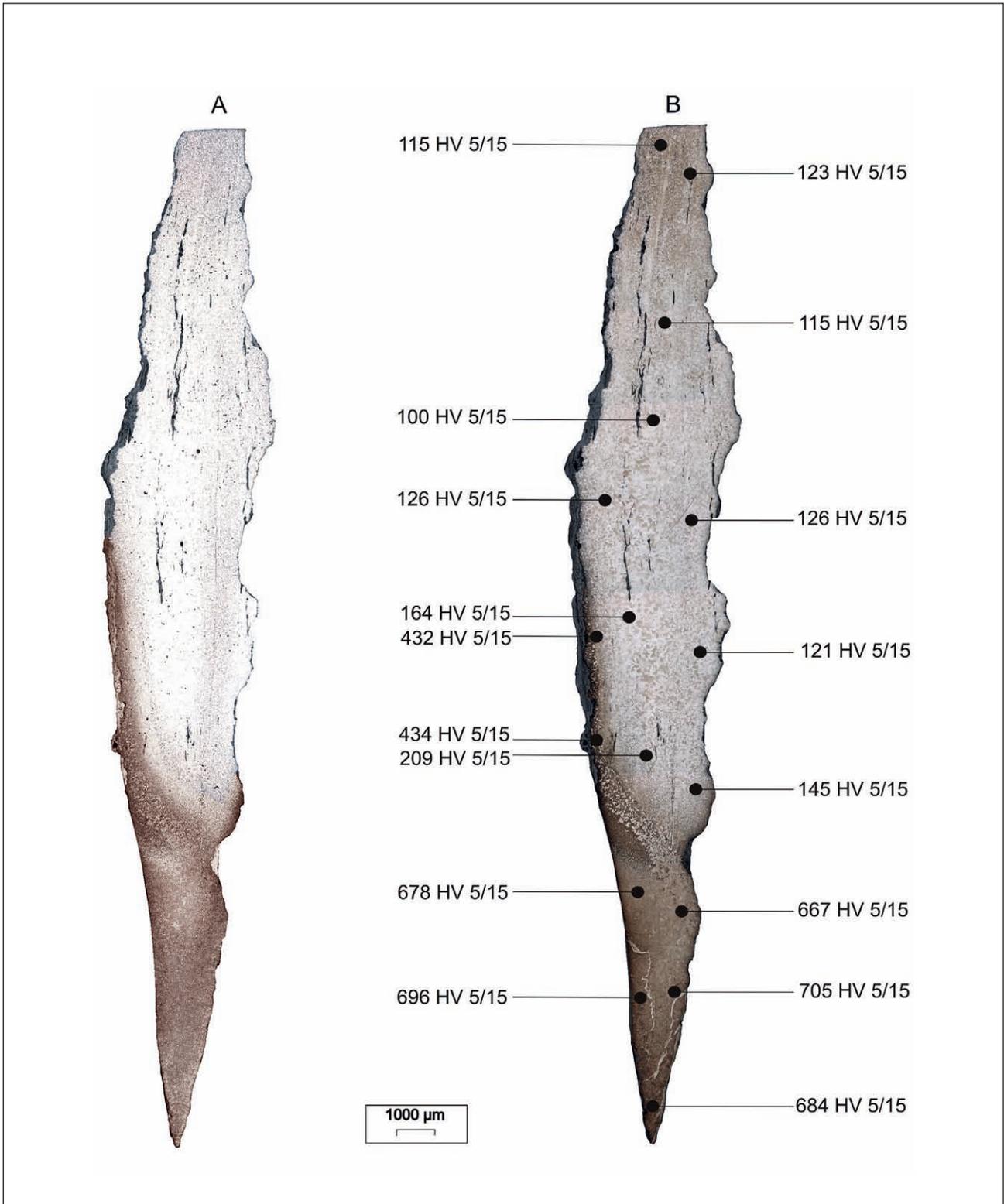
Taf. 72. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36000, Probe 2, Klingenspitze: schematische Darstellung des Querschliffes (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



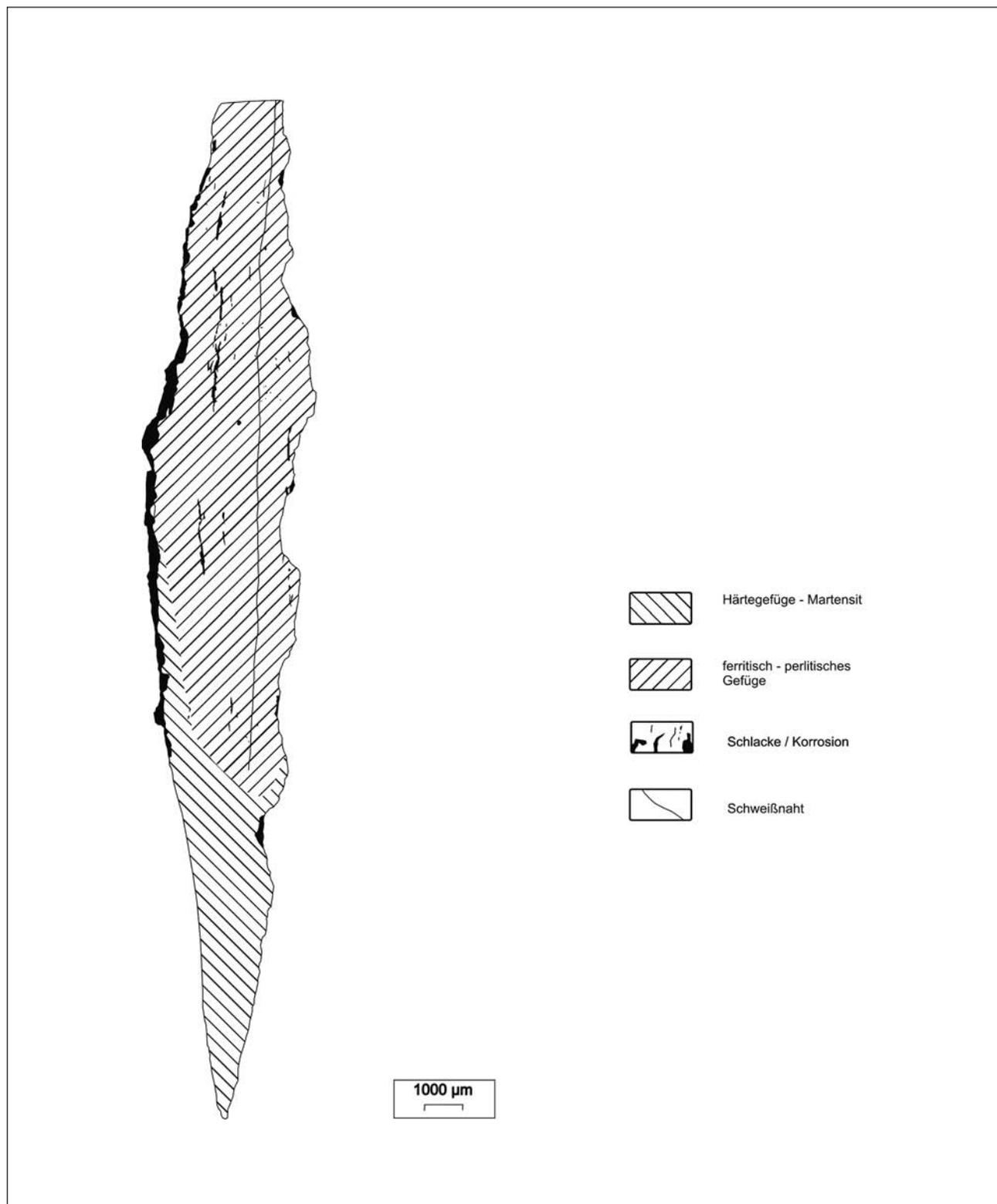
Taf. 73. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36000, Detailaufnahmen Probe 1 (Klingenmitte). – 1. Perlit mit etwas Korngrenzenferrit. – 2. Grobkörniges ferritisches Gefüge, teilweise mit Korngrenzenperlit; zahlreiche zeilenförmige Schlackeneinschlüsse. – 3. Bainitisches Gefüge mit vereinzelt Perlitinseln im Schneidenbereich. – 4. Zunehmender Kohlenstoffgehalt von links nach rechts; ferritisch-perlitisches Gefüge (links), perlitisches Gefüge mit Korngrenzenferrit (rechts). – 5. Ferritisch-perlitisches Gefüge; aufgekohlte Schweißnaht als Anzeichen für den Furnierdamast (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



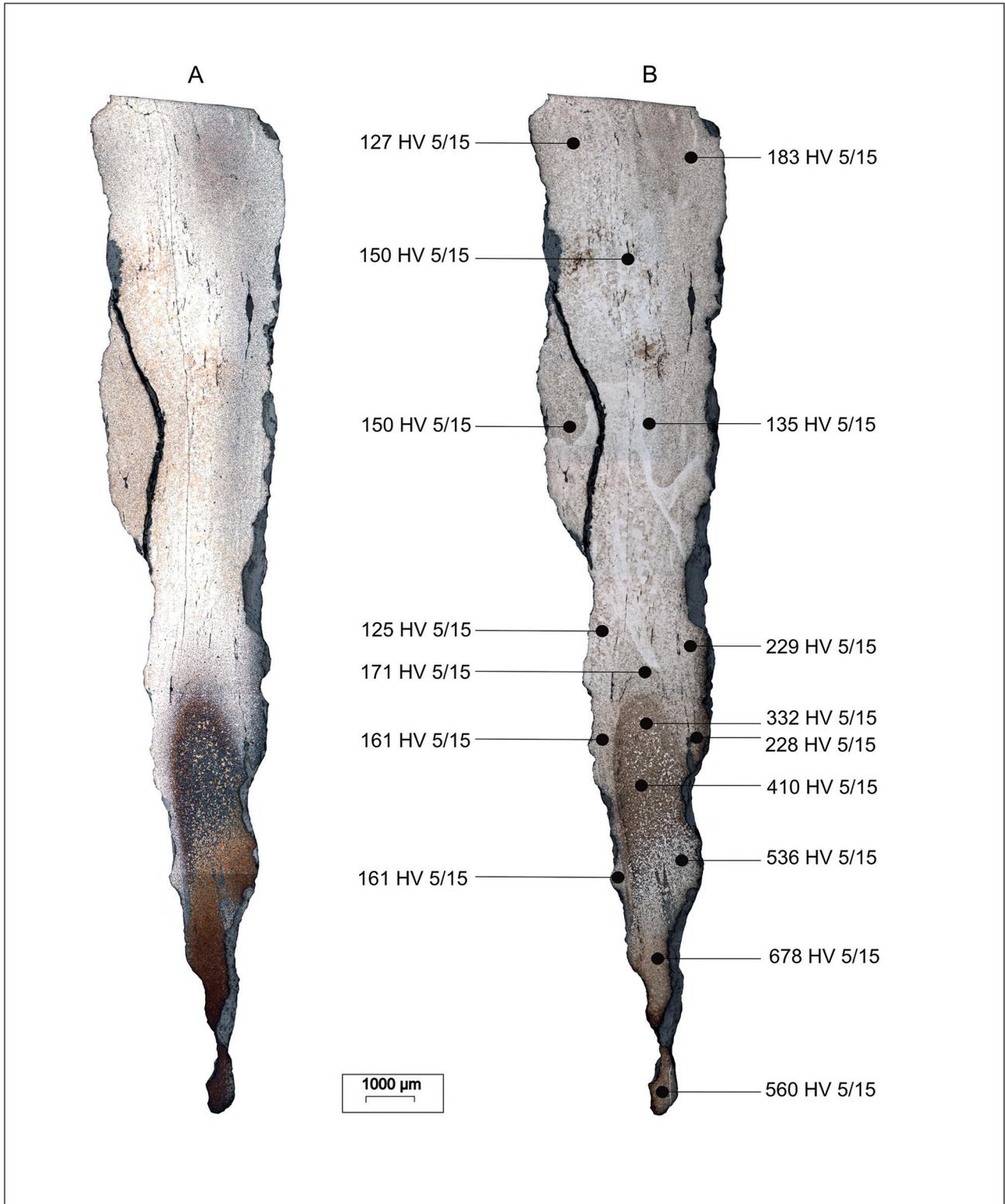
Taf. 74. Thunau, Obere Holzwiese, Schwert Inv. Nr. 36000, Detailaufnahmen Probe 2 (Klingenspitze). – 1. Härtegefüge (Martensit) im Schneidenbereich; nadelige Struktur des Martensit. – 2. Grobkörniger Ferrit im Mittelteil der Probe; vereinzelt Korngrenzenperlite. – 3. Perlitisch-ferritisches Gefüge in Widmanstättenanordnung. – 4. Aufgekohlte Schweißnaht im rechten Randbereich; Furnierdamast (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



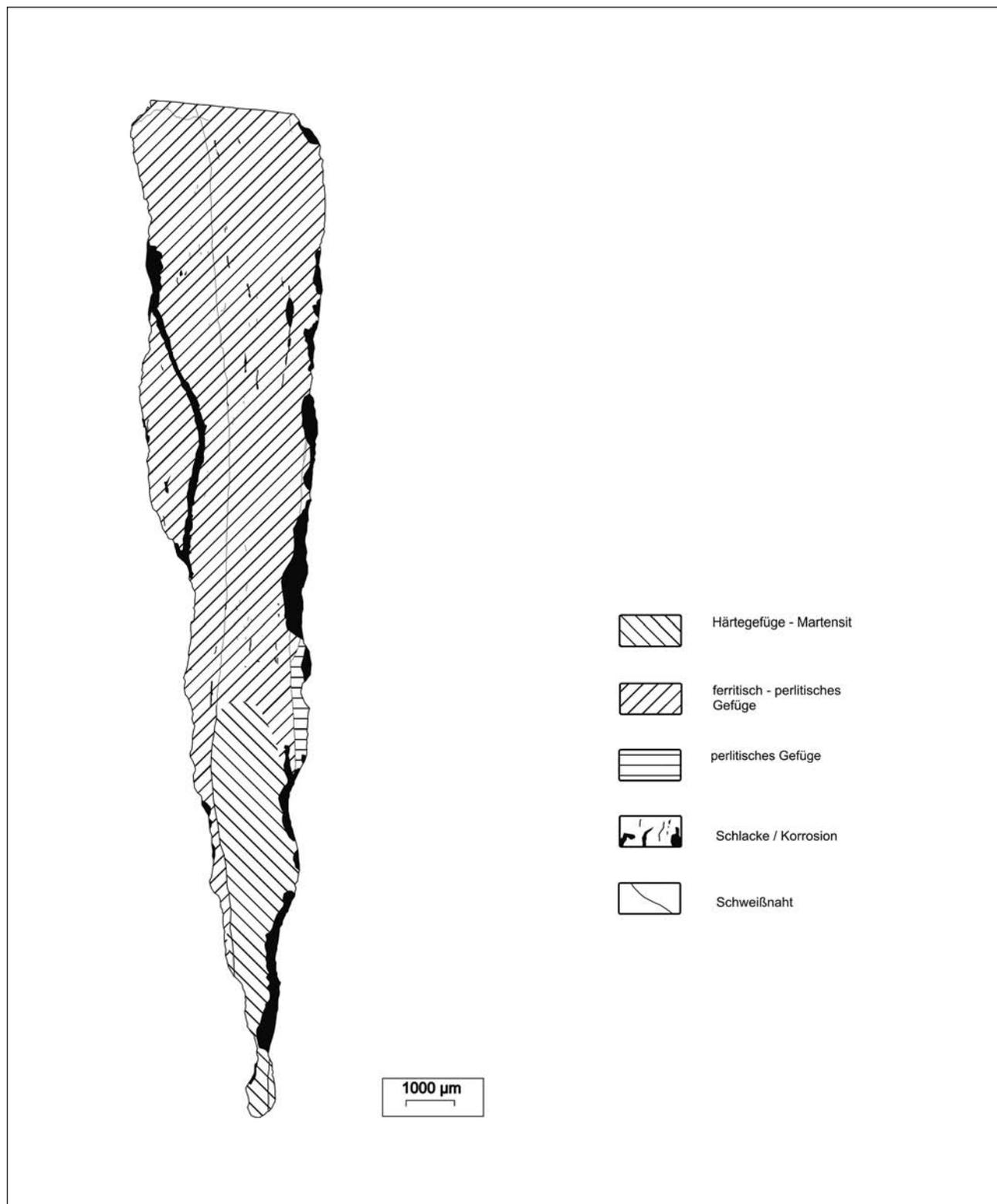
Taf. 75. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36040, Gesamtansicht Probe 1, Klinge mitte: A – Ätzung mit Nital, B – Ätzung nach Oberhoffer, Härtemessung nach Vickers (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



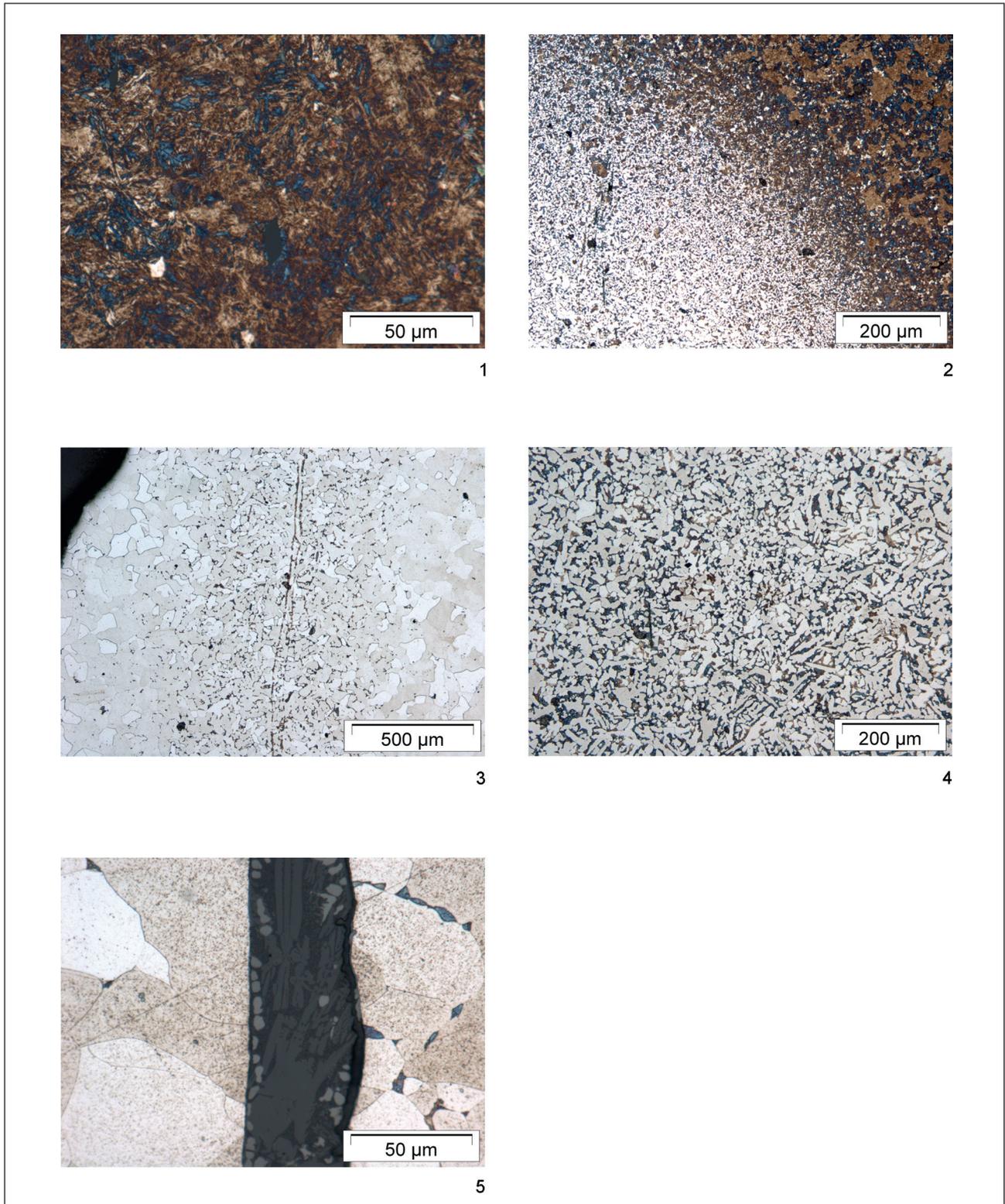
Taf. 76. Thunau, Obere Holzwiese, Schwert Inv. Nr. 36040, Probe 1, Klingemitte: schematische Darstellung des Querschliffes (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



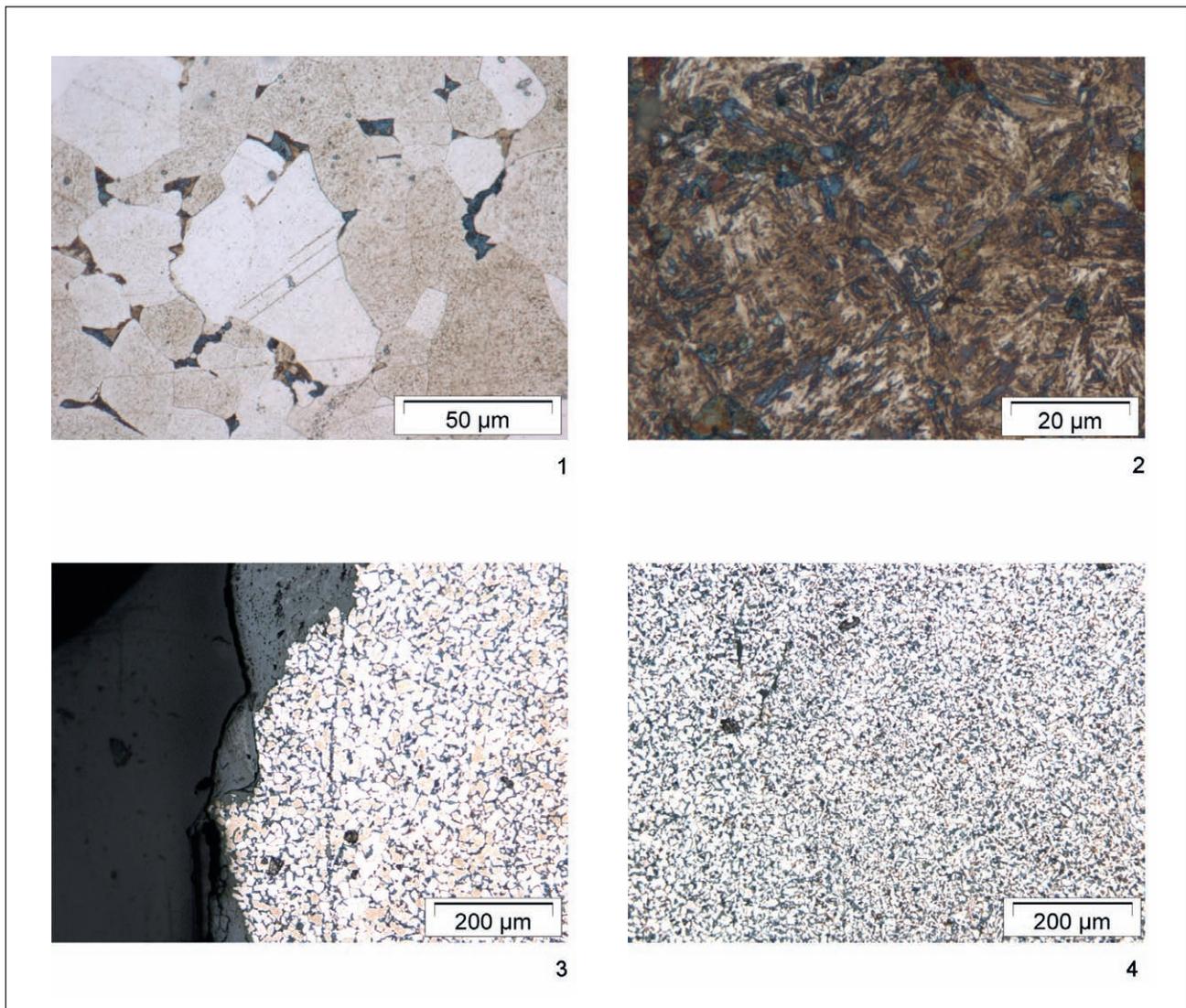
Taf. 77. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36040, Gesamtansicht Probe 2, Klingenspitze: A – Ätzung mit Nital, B – Ätzung nach Oberhoffer, Härtemessung nach Vickers (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



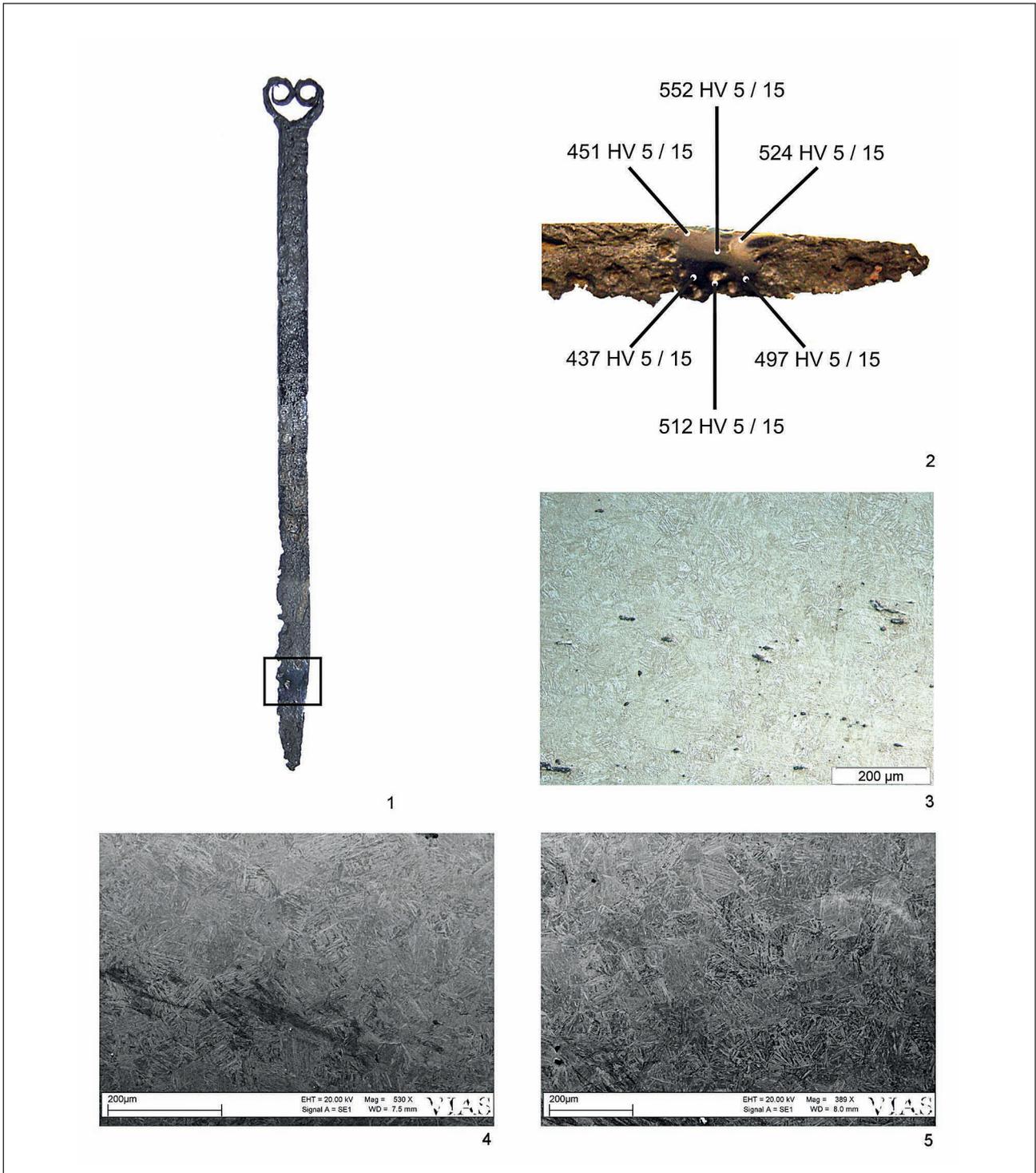
Taf. 78. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36040, Probe 2, Klingenspitze: schematische Darstellung des Querschliffes (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



Taf. 79. Thunau, Obere Holzweise, Schwert Inv. Nr. 36040, Detailaufnahmen Probe 2 (Klingenspitze). – 1. Härtegefüge (Martensit) im Schneidenbereich. – 2. Übergang von Härtegefüge (rechts oben) zum ferritisch-perlitischem Gefüge (links unten). – 3. Schweißnaht in der Bildmitte; höherer Kohlenstoffgehalt entlang der Schweißnaht. – 4. Ferritisch-perlitisches Gefüge in der Probenmitte, zum Teil in Widmannstättenanordnung. – 5. Grober zeilenförmiger Schlackeneinschluss; in der Schlacke können Wüstit (hell) und Fayalit (grau) in Glasmatrix (dunkel) unterschieden werden (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



Taf. 80. Thunau, Obere Holzwiese, Schwert Inv. Nr. 36040, Detailaufnahmen Probe 2 (Klingenspitze). – 1. Grobkörniger Ferrit mit Korngrenzenperliten; Neumannsche Linien innerhalb eines Ferritkornes, die auf abschließendes Kalthämmern hinweisen. – 2. Härtegefüge (Martensit) im Schneidenbereich. – 3. Ferritisch-perlitisches Gefüge; die aufgekohlte Schweißnaht in der Mitte verbindet das Kernmaterial mit einer links davon gelegenen Metalleinlage. Dies könnte der Rest eines Furnierdamastes sein. – 4. Feinkörniges ferritisch-perlitisches Gefüge im oberen Bereich der Probe (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).



Taf. 81. Thunau, Obere Holzweise, Messer Inv. Nr. 34739. – 1. Gesamtansicht; das Rechteck markiert die Stelle des oberflächlichen Anschliffes. – 2. Detail des Anschliffes mit den Ergebnissen der Härtemessung. – 3. Mikrogefüge; nadelige Struktur des Martensit (Härtegefüge); Aufnahme im Lichtmikroskop. – 4. Nadelige Struktur des Martensit; Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop. – 5. Nadelige Struktur des Martensit; Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop. (Grafik: E. Nau, M. Mehofer).

