

Portable Röntgenfluoreszenzanalytik (pXRF): Mit dem «Labor in der Hand» der Vergangenheit auf der Spur

Pickel, Schaufel und Spatel gehören zwar noch immer zur archäologischen Feldausrüstung, immer öfter kommen aber bereits im Feld oder spätestens bei der Auswertung im Büro High-Tech Geräte zum Einsatz. Tragbare Röntgenfluoreszenz-Analysatoren sind ein Beispiel solcher Geräte, die zur grossen Freude archäologischer Konservatoren zerstörungsfreie Analysen ermöglichen.

Autoren

Regine Stapfer,
Caroline Heitz,
Martin Hinz,
Albert Hafner

Materialanalysen ergänzen die «traditionelle» archäologische Forschung

Materialanalysen und Herkunftsbestimmungen von Rohmaterialien bilden ein Schlüsselement in der archäologischen Forschung und öffnen ein breites Feld an aktuellen Forschungsthemen: So lassen sich Materialzusammensetzung bestimmen und Herstellungsprozesse rekonstruieren, technische Innovationen feststellen wie auch wirtschaftsgeschichtliche Fragestellungen untersuchen. Die Verbreitung von Rohmaterialien kann Hinweise auf Handels- und Kontaktnetze geben und die Kombination mit typologischen und stilistischen Klassifizierungen ermöglicht sogar Einblicke in frühere Gesellschaftsstrukturen.

Materialanalysen und Herkunftsbestimmungen von Rohmaterial leisten für sich

allein schon einen wichtigen Forschungsbeitrag. Doch in Kombination mit anderen Methoden (z.B. Formentwicklung, Herstellungstechnik) und durch überregionale Vergleiche multipliziert sich ihre Aussagekraft um ein Vielfaches.

Eine kurze Geschichte der Materialanalytik in der archäologischen Forschung

Nach ersten Studien im ausgehenden 19. und der ersten Hälfte des 20. Jhs. werden seit den 1950er Jahren kontinuierlich archäologische Funde mit modernen naturwissenschaftlichen Methoden untersucht. Ein grundlegendes Werk zur Keramikanalyse «Ceramics for the Archaeologist» verfasste ANNA O. SHEPARD 1956. Weiter waren die fast gleichzeitige Gründung des «Research Laboratory for Archaeology and History of Art» an der Universität Oxford im Jahr 1955 mit E. T. Hall als

Direktor sowie die Anfänge der INA¹-Analysen an Keramik am «Brookhaven national Laboratory» in New York unter Ed Sayre im Jahr 1957 wichtige Schritte für die naturwissenschaftliche Analyse von Keramikartefakten. Das Labor der Universität Oxford entwickelte sich danach zu einem internationalen Fachzentrum für Archäometrie und die 1958 lancierte Zeitschrift «Archaeometry» ist heute eine der international renommiertesten Fachzeitschriften für Materialanalysen in der Archäologie (TITE 2017, 8–9). Auch geochemische analytische Methoden, v.a. zur Bestimmung von Spurenelementen, wurden zu dieser Zeit erstmals in Pilotstudien eingesetzt. So untersuchten der Erdwissenschaftler J. CANN und der Archäologe C. RENFREW (1964, in Cambridge) die Herkunft von Obsidian-Artefakten mittels spektrographischer Methoden und konnten damit klar deren Herkunft aus dem Mittelmeerraum aufzeigen (siehe auch WILLIAMS-THORPE 2007). Diese Methode wurde später durch NAA oder XRF-Analytik weitgehend ersetzt, wobei auch hier wichtige Beiträge aus den Erdwissenschaften kamen (z.B. NISBET ET AL. 1979).

Seit den Anfängen archäometrischer Studien wurden die Analysemöglichkeiten in den letzten fünf Jahrzehnten durch technologische Fortschritte um ein Vielfaches erweitert. Gerade die Miniaturisierung der Geräte, deren zunehmende Mobilität und auch die immer geringeren Probemengen, die zu einer Untersuchung notwendig sind, begünstigen Materialanalysen von archäologischen Objekten. Aber auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Chemikern, Physikern und Erdwissenschaftlern spielt eine zentrale Rolle für ihren Erfolg. So stehen heute zur Untersuchung archäologischer Funde zahlreiche Analysemethoden zur Verfügung (TITE 2017, 8–9). Sie werden in verschiedenen Labors rund um die Welt angewendet,

ständig weiterentwickelt und tragen viel zur Erforschung der Vergangenheit bei.

Mit unterschiedlichen Methoden der Vergangenheit auf der Spur

Seit mehreren Jahrzehnten werden eine Vielzahl an Methoden in der archäologischen Materialanalytik eingesetzt, die ursprünglich vor allem in der Physik und der Chemie entwickelt wurden, heute aber allesamt ein wichtiges Standbein der Erdwissenschaften darstellen. Auch die für die Erdwissenschaften typischen mikroskopischen Untersuchungen unter dem Binokular (Stereo- oder Auflichtmikroskop), an Dünnschliffen mittels Polarisationsmikroskop oder die hoch auflösenden Unter-

«Seit den Anfängen archäometrischer Studien wurden die Analysemöglichkeiten in den letzten fünf Jahrzehnten durch technologische Fortschritte um ein Vielfaches erweitert.»

suchungen mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) oder Elektronenmikrosonde bilden wichtige Methoden der Materialanalytik. Deshalb wird bei solchen Untersuchungen oft auch von Geoarchäologie oder Archäogeologie gesprochen oder der generelle Begriff Archäometrie verwendet.

Die häufigsten analytischen Methoden² lassen sich nach ihren Einsatzgebieten klassieren:

- Identifikation von Feststoffen und Mineralien: Röntgendiffraktionsanalytik (XRD) und Raman-Spektroskopie. Dann auch «optische» Methoden wie Mikroskopie, REM und Elektronenmikrosonde.

1 Die INAA, die Instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse, ist eine Variante der unten erwähnten NAA und wird in der Materialanalytik eingesetzt.

2 Es existieren weitere Methoden, auf die wir aber nicht weiter eingehen. Eine gute Zusammenfassung verschiedener Methoden für archäologische Zwecke findet sich u.a. in POTTS & WEST 2008).

- Bestimmung von Haupt- und Spurenelementen: Röntgenfluoreszenz-Analytik (XRF) und Neutronenaktivierungsanalyse (NAA).

Spurenelemente und deren Isotopenzusammensetzung lassen sich durch verschiedene Arten der Massenspektrometrie wie z.B. der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS), der Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) oder der Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS, siehe Beitrag SZIDAT und STAPPER, S. 20) bestimmen.

Richtig spannend wurden diese Methoden für archäologische Fragestellungen nicht zuletzt durch die immer kleineren Probemengen, die für eine Untersuchung notwendig sind. Diese führen zu geringeren (oder keinen) Beschädigungen der archäologischen Objekte, was dem Konservierungsauftrag von archäologischen Dienststellen besser entspricht.

Mit diesen Analysemethoden wurden während der letzten Jahrzehnte sehr viele archäologische Funde aus unterschiedlichsten Materialien untersucht und die Resultate stehen der heutigen Forschung als Vergleichsbasis zur Verfügung. Ein wichti-

«Richtig spannend wurden diese Methoden für archäologische Fragestellungen nicht zuletzt durch die immer kleineren Probemengen, die für eine Untersuchung notwendig sind.»

ges Anwendungsgebiet ist z.B. die Analyse von Keramikgefässen und Töpfereiabfällen verschiedenster Epochen. Deren chemische Zusammensetzung kann Aufschluss über eine mögliche Herkunft und geographische Verbreitung liefern. Damit lassen sich lokal und nicht lokal hergestellte Gefässe unterscheiden, Produktionszentren fassen, technologische Entwicklungen untersuchen sowie mittels Gebrauchsspurenanalysen (z.B. durch Isotopenanalysen oder Gaschromatographie-Massenspektrometrie GC-MS) Informationen über ihre

Verwendung gewinnen (z.B. MAGGETTI 2001, THIERRIN-MICHAEL ET AL. 2003, CARRER ET AL. 2016). Ein weiteres Anwendungsfeld sind archäometallurgische Untersuchungen an Metallfunden und Abfallprodukten der Metallverarbeitung, die interessante Erkenntnisse zu Entstehung, Ausbreitung und Fortschritten in der Metallverarbeitung sowie zur Herkunft und den Abbaustellen der Rohmaterialien liefern (z.B. SERNEELS 1993, RADIVOJEVIĆ ET AL. 2018, BORG UND PERNICKA 2017).

Neben Keramik und Metall werden Materialanalysen auch zur Untersuchung archäologischer Fundobjekte und Befunde anderer Materialien genutzt, z.B. Gesteine, Silex, Obsidian, Glas, Farbpigmente, Mörtel oder Ablagerungen im Boden – die aufgrund der Nutzung eines Areals entstanden sind. Optische und physikalische Methoden liefern weitere Informationen zur mineralogischen Zusammensetzung, dem Gefüge und der Entstehung der Kristallstruktur, zu technologischen Aspekten (Herstellungstechnik, Brennvorgang und Brenntemperatur) sowie zu Zusammensetzung und Herkunft von Rohmaterialien (siehe Beitrag THIERRIN ET AL., S. 156 und Beitrag AFFOLTER, S. 166). Wichtige Informationen zur Analyse von Bodenaufbau und Schichtbildungsprozessen liefern mikromorphologische Untersuchungen, welche sowohl direkt in situ am Befund wie auch im Labor an Dünnschliffen vorgenommen werden (siehe Beitrag ISMAIL-MEYER und RENTZEL, S. 178).

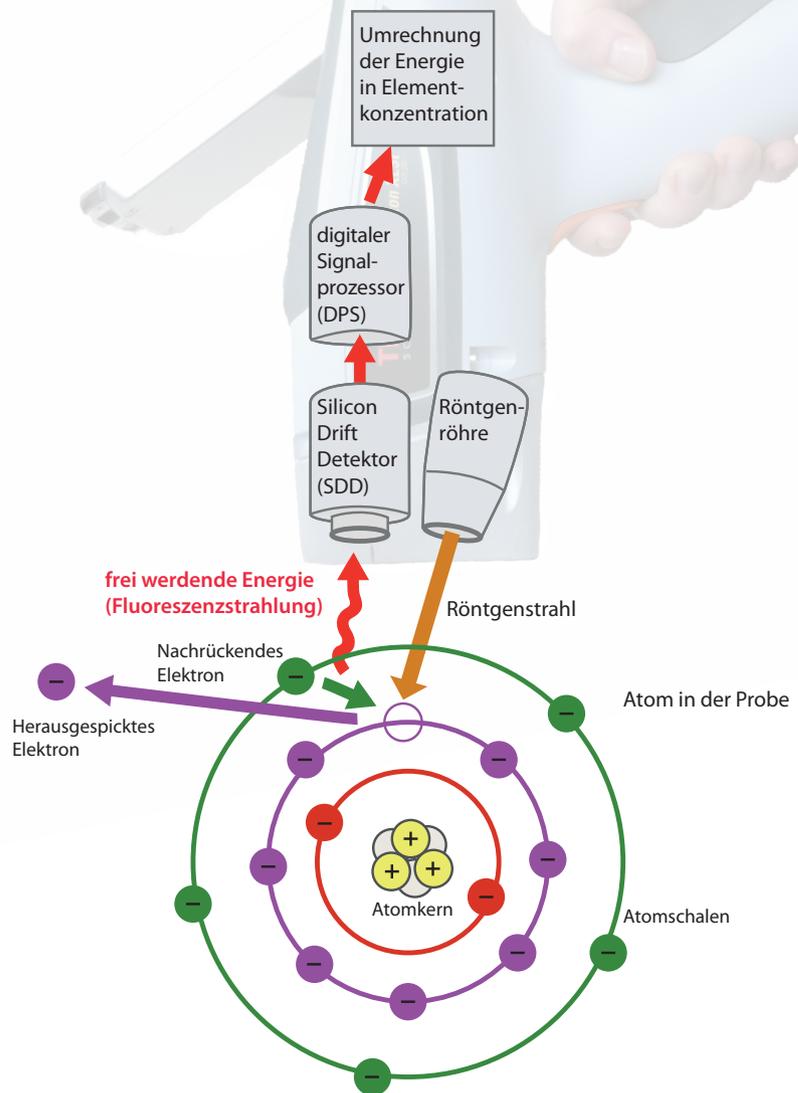
Oft werden in einem mehrstufigen Verfahren verschiedene Methoden angewendet, z.B. makro- und mikroskopische Beschreibung und Gruppierung, mineralogische und petrographische Untersuchungen und chemische Analysen. So können in verschiedenen Schritten Fragestellungen entwickelt, präzisiert und (hoffentlich) beantwortet werden.

Im Folgenden wird von den Methoden zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung die portable Röntgenfluoreszenz näher vorgestellt. Detaillierte Beschreibungen weiterer Analysemethoden, die häufig zur Analyse archäologischer Objekte verwendet werden, wie NAA/INAA, ICP-MS, WD- und ED-XRF, finden sich in

zahlreichen Übersichtswerken zu Keramikanalyse und Archäometrie (z.B. HUNT 2017, WAGNER 2007 oder MOMMSEN 1986).

(Fast) zerstörungsfrei analysieren mit portabler Röntgenfluoreszenz (pXRF)

Herkömmliche Labor-XRF-Analytik wird schon seit Jahrzehnten zur Untersuchung archäologischer Funde eingesetzt und vermehrt hielten in der Archäologischen Forschung portable Geräte Einzug. Im vergangenen Jahrzehnt hat die Verwendung portabler XRF Analysatoren einen regelrechten «Boom» erlebt. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Miniaturröntgenröhre der portablen Geräte und Verbesserung der Detektorleistung, sind nun auch leichte Elemente wie Silizium, Aluminium und Magnesium präziser analysierbar, weshalb die ursprünglich in der Metallindustrie eingesetzten Geräte heute in verschiedensten Untersuchungsgebieten Anwendung finden. Gerade in der Schweiz werden sie z.B. intensiv zur Untersuchung von mit Schwermetallen belasteten Böden eingesetzt. In der Archäologie werden sie u.a. zur qualitativen und quantitativen Analyse von Bodenproben, Gesteinsartefakten oder Keramik genutzt (z.B. HELFERT 2010, 13). pXRF-Analysen sind höchst interessant für die archäologische Forschung und die Vorteile dieser Methode liegen auf der Hand: Im Gegensatz zu allen bisher verwendeten Labor-Messverfahren, ermöglichen die knapp über ein Kilogramm wiegenden Geräte eine Analyse vor Ort im Feld (*in situ*), im Funddepot oder im Museum. Dies ist für die Analyse von Bodenproben resp. archäologischer Befunde sowie auch von Fundmaterial ein grosser Vorteil, da aufwendige Probeentnahmen und -aufbereitungen, Transporte, Ausleihen etc. wegfallen. Weiter sind pXRF-Analysen zerstörungsfrei oder verlangen nur eine minimale Probenvorbereitung wie eine gereinigte Stelle oder frische Bruchfläche bei Keramikscherben; dies ermöglicht einerseits sehr schnelle, kostengünstige und somit an zahlreichen Objekten durchführbare Materialanalysen und



eröffnet auch die Möglichkeit einer statistischen Auswertung. Andererseits können mit zerstörungsfreien pXRF-Analysen herausragende und daher besonders aussagekräftige archäologische Fundstücke analysiert werden, welche als Kulturobjekte möglichst unbeschadet der Nachwelt erhalten bleiben sollen.

Funktionsweise eines pXRF-Gerätes

Eine einzelne Messung erfolgt in mehreren, parallel zueinander stattfindenden Schritten: Die Miniaturröntgenröhre im Analysator erzeugt eine Röntgenstrahlung, die über das Messfenster auf das Probenmaterial gerichtet wird (Abb. 1). Durch die Bestrahlung wird die Probe angeregt, d.h.

Abb. 1: pXRF: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines pXRF-Analysators, wie er für das Anwendungsbeispiel verwendet wurde.

es werden Elektronen aus den inneren Schalen eines Atoms der Probe geschlagen, woraufhin Elektronen aus höheren Schalen nachrücken und dabei Energie in Form von Fluoreszenzstrahlung aussenden. Diese für jedes Element charakteristische Fluoreszenzstrahlung wird vom Detektor erfasst und vom digitalen Signalprozessor (DSP) verarbeitet. Mittels einer einzigen Messung können so (je nach Gerät) sämtliche verfügbaren Elemente qualitativ und (teils auch) quantitativ bestimmt werden.

Die pXRF-Analysatoren basieren generell auf der gleichen Analyseverfahren wie Laborgeräte, auch die Nachweisgrenzen gleichen sich immer mehr an. Trotzdem bestehen gewisse Unterschiede: Laborgeräte sind vielfach wellenlängendispersive Systeme (WD-XRF), arbeiten unter Vakuum und sind selten zerstörungsfrei. Sie verlangen in den meisten Fällen die Aufbereitung einer Probe. Die Kalibration³ der Geräte erfolgt durch spezifisch geschultes Personal der Labors unter Verwendung gut bekannter Messstandards (oft

Kalibration des Gerätes wird in der Regel werksseitig vorgenommen, ein Anwender hat keinen Einfluss darauf.⁵

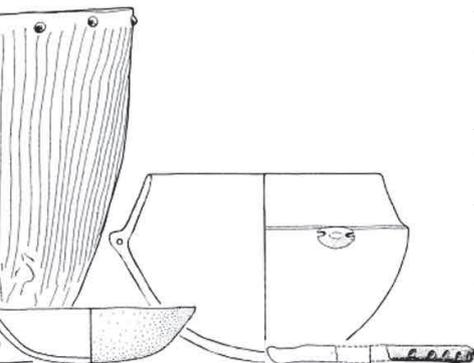
Der wohl wichtigste Unterschied zu Laborgeräten ist das Fehlen von Laborbedingungen, insbesondere das Fehlen eines Vakuums. Obschon mit Spezialgeräten⁶ die Elemente Mg (Z=12) bis U (Z=92) erfasst werden können, ist die Quantifizierung leichter Elemente wie Silizium, Aluminium und Magnesium limitiert, da deren Signale durch die Interaktion mit der Luft stark abgeschwächt werden. Das noch leichtere Natrium (Z=11) kann sogar nur im Labor unter Vakuum bestimmt werden. Ob dieser Umstand ein Problem darstellt, kommt hauptsächlich auf die Zusammensetzung des Untersuchungsobjektes an.

Unsere Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass bei diesen leichten Elementen von einem erhöhten Fehler ausgegangen werden muss, sofern die Konzentrationen nahe der Nachweisgrenze liegen. Daher müssen die Messresultate entsprechend mit Vorsicht interpretiert werden.

Neben diesem Hauptfaktor unterscheiden sich pXRF- und Labor-XRF-Analysen vor allem in der Probenaufbereitung: Für Laboranalysen wird das einer Probe entnommene, pulverisierte Material in Form einer ebenen Press- oder Schmelztablette für die Messung aufbereitet. Das Material wird dabei homogenisiert, was den Einfluss von ungleichmässiger Materialverteilung innerhalb einer Probe verringert. Im Gegensatz dazu werden bei pXRF-Analysen meist die nicht ganz ebenen und nicht homogenisierten Ober- oder Bruchflächen eines Objektes gemessen. Dies kann zur Abschwächung der gemessenen Intensitäten und zu abweichenden Analyseresultaten als Folge einer heterogenen Zusammensetzung der Probe führen. Jüngere Arbeiten haben gezeigt, dass sich die Abschwächung

«Der Verzicht auf Homogenisierung bei pXRF-Messungen kann aber auch gezielt eingesetzt werden, beispielsweise um die Heterogenität einer Probe an verschiedenen Stellen zu untersuchen.»

internationale NIST-Standards des National Institute of Standards and Technology). PXRF-Geräte besitzen meist ein energiedispersives System (ED-XRF) und die gesamte Analyse findet mittels portablen Gerät nicht unter Laborbedingungen oder im Vakuum⁴ statt. Eine Probenaufbereitung (Homogenisierung) erfolgt meist nicht. Die



³ Unter Kalibration versteht man in diesem Zusammenhang die «Eichung» eines Gerätes auf bestimmte Messstandards mit exakt bekannten Elementkonzentrationen.

⁴ Ausser bei speziell ausgerüsteten Geräten mit Helium-Spülung im Messkopf und Vakuumpumpe.
⁵ Einige Geräte erlauben eigene Kalibrationen. Dazu sind aber eine vertiefte Kenntnis der Gerätefunktionen und hervorragend definierte Messstandards notwendig.

⁶ z.B. mit der von den Autoren verwendeten GOLDD+-Versionen der Niton XL3t Geräte von Thermo Fisher

der Signale durch unebene Oberflächen mittels empirischer Feinkalibration korrigieren lässt (HELFFERT 2013, 22–26). Der Verzicht auf Homogenisierung bei pXRF-Messungen kann aber auch gezielt eingesetzt werden, beispielsweise um die Heterogenität einer Probe an verschiedenen Stellen zu untersuchen. Wichtig bei Messungen mit pXRF ist, dass der Messpunkt am Probenmaterial gezielt ausgesucht wird, da archäologische Objekte eine Kontamination durch Bodenlagerungseffekte etc. aufweisen können. Um die Repräsentativität der Messung für das gesamte Objekt zu erhöhen, lohnt es sich, ein Objekt an mehreren Stellen zu analysieren und aus den korrekt scheinenden Messungen einen Mittelwert zu berechnen.

Trotz all dieser Einschränkungen ist pXRF-Analytik durch die minimalinvasiven, schnellen und vergleichsweise kostengünstigen Analysen bei einer der Fragestellung angepassten Anwendung hervorragend zur Untersuchung archäologischer Objekte geeignet. Ebenso bildet sie eine gute Möglichkeit, um schnell eine vielversprechende Auswahl für weitere, aufwendigere Analysen (z.B. Laboranalysen oder Dünnschliffuntersuchungen) zu treffen (Screening). Dies soll im Folgenden anhand eines Anwendungsbeispiels gezeigt werden.

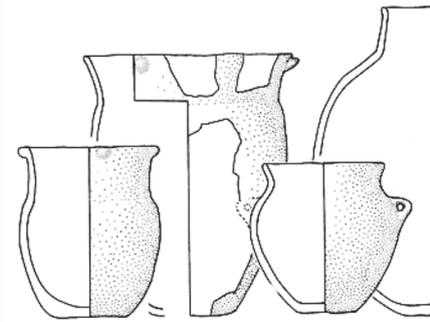
Waren neolithische Gesellschaften vernetzt und mobil?

Die Erforschung zahlreicher Seeufer- und Feuchtbodensiedlungen in der Schweiz und angrenzenden Ländern während der letzten Jahrzehnte lieferte eine hervorragende Datenbasis zur Untersuchung neolithischer (jungsteinzeitlicher) Gesellschaften. Einerseits können durch die guten Erhaltungsbedingungen im feuchten Milieu mit Hilfe der Dendrochronologie (siehe Beitrag BOLIGER, S. 40) zahlreiche Hausgrundrisse und Siedlungsentwicklungen nahezu jahrgenau rekonstruiert werden. Andererseits liegt aus den Fundschichten eine Fülle an Fundmaterial aus diesen Siedlungen vor. Dieses bietet einzigartige Einblicke in den Alltag ihrer Bewohner.

Forschungsprojekt MET

Ziel des Forschungsprojektes «Mobilities, Entanglements and Transformations in Neolithic Societies of the Swiss Plateau (3900–3500 BC)» – kurz: MET – ist es, die komplexen Beziehungen neolithischer Gesellschaften besser zu verstehen. Das Forschungsprojekt wurde 2014 am Institut für Archäologische Wissenschaften (IAW) der Universität Bern initiiert und vom Schweizerischen Nationalfonds (Projektnummer 100011_156205) unterstützt. Anhand von Keramik aus gut datierten Seeufersiedlungen aus der 1. Hälfte des 4. Jts. v. Chr. wird versucht, Beziehungsnetzwerke in Siedlungen zwischen der Dreiseenregion und dem Bodensee zu fassen. Dazu werden insbesondere Gefäße, die Hinweise auf Mobilität zeigen, mit verschiedenen Ansätzen aus Archäologie und Archäometrie untersucht. Ergänzend dazu werden die beobachteten Mobilitätsmuster mit der Herkunft des Silex-Rohmaterials aus den gleichen Siedlungen verglichen (siehe HAFNER ET AL. 2016a).

Neolithische Kulturraumgrenzen wurden traditionell anhand von sich unterscheidenden Keramiktypen gezogen. Die darauf basierenden Annahmen, dass verschiedene Keramikstile homogene (ethnische) Bevölkerungsgruppen mit wenig Kontakt zu benachbarten Gruppen widerspiegeln und Veränderungen in der Keramik vor allem mit langfristiger Migration ganzer Gruppen erklärt werden müssten (z.B. VOGT 1934; WINIGER 1971), können heute abgelöst



«Die aktuelle Forschung zeigt, dass zwischen den in verschiedenen Siedlungen lebenden sozialen Gruppen komplexe und vielfältige Beziehungen bestanden.»

werden (Abb. 2). Die aktuelle Forschung (z.B. MET-Projekt) zeigt, dass zwischen den in verschiedenen Siedlungen lebenden sozialen Gruppen komplexe und vielfältige Beziehungen bestanden (HEITZ & STAPFER 2016, Abb. 191; STAPFER 2017, Fig. 2). Rohmaterialien aus nah und fern wurden verarbeitet und Keramikherstellungspraktiken aus verschiedenen Regionen trafen zusammen; so kommen z.B. in zahlreichen Siedlungen neben regionaltypisch geformter

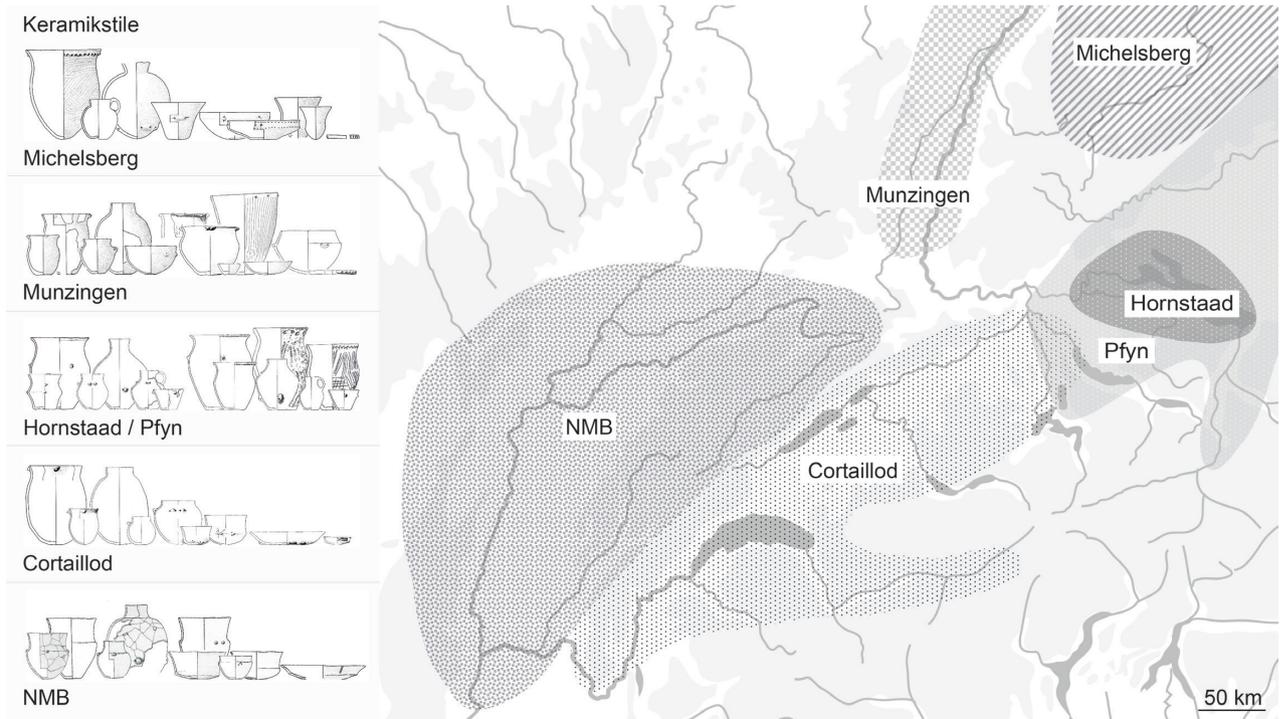


Abb. 2: Rechts: Hauptverbreitung verschiedener Keramikstile im schweizerischen Mittelland und angrenzenden Regionen (4000–3500 v. Chr.). Links: Verschiedene Keramikstile: «Michelsberg» aus Untergrombach-Michelsberg. «Munzingen» von Munzingen-Tuniberg, Didenheim-Lerchenfeld, Mundolsheim und Holzheim-les Abattoirs. «Hornstaad» aus Hornstaad-Hörnle IA. «Pfyf» aus Eschenz-Insel Werd III und Thayngen-Weier. «Cortaillod» aus Twann. «Néolithique moyen Bourguignon (NMB)» aus Clairvaux. («Verbreitungsgebiete» nach HAFNER ET AL. 2016b. Keramikzeichnungen nach: LÜNING 1967, WIEHMANN 1998, MAIER 1958 und SCHWEITZER 1987 alle zitiert nach STÖCKLI 2009, Taf. 123–125, 135, 137, 145, 147; MATUSCHIK 2011, Taf. 1, Taf. 7, Taf. 19, Taf. 50, Taf. 54, Taf. 64; HASENFRATZ 1985, Taf. 4, Taf. 5, Taf. 18, Taf. 20, Taf. 22; WINIGER 1971, Taf. 8, Taf. 9; STÖCKLI 2009, Taf. 31; PÉTREQUIN & PÉTREQUIN 2015, fig. 34).

Keramik auch solche vor, die an benachbarte Regionen erinnert (Abb. 3).

Doch was bedeuten anders geformte Gefässe? Wurden sie andernorts hergestellt und gelangten als Tauschware in die Siedlung? Zeugen sie von einem Umzug aus einem Gebiet mit anderer Töpfereipraxis? Oder wurden sie vor Ort von Personen hergestellt, die das Töpfeln in anderen Regionen gelernt hatten? Könnten die Gefässe auch Kombinationen verschiedener Praktiken der Keramikherstellung widerspiegeln? Dies sind nur einige der möglichen Mobilitätsmuster, welche sich in der Präsenz stilistisch auffälliger Gefässe «materialisieren» können (siehe HEITZ 2017; STAPPER 2017). Wichtige Hinweise, um diese Muster besser zu verstehen, liefern neben stilistischen Beobachtungen auch naturwissenschaftliche

Untersuchungen zu Herstellungstechnik und Herkunft. Doch trotz vielversprechender Resultate wurden solche im Untersuchungsgebiet bisher nur sporadisch durchgeführt, da sie zeit- und kostenintensiv sind (STAPPER ET AL. in Vorbereitung). Im Rahmen des MET-Projektes konnten erstmals grosse Serien typologisch aussagekräftiger Keramik aus verschiedenen Regionen einer schnellen, minimalinvasiven Untersuchung aus makroskopischer Gruppierung und chemischer Analyse mittels pXRF unterzogen werden. Ergänzend wurden Stichproben sowie auffällige Stücke mit Dünnschliffen und Labormethoden (XRF, XRD, REM) untersucht. Die Anwendbarkeit von pXRF zur Untersuchung heterogener, grobgemachter Keramik wurde zuvor evaluiert (STAPPER ET AL. in Vorbereitung).



Abb. 3: Gefässe verschiedener Keramikstile aus Twann (BE): Regionaltypisch geformte Gefässe im Cortaillod-Stil (oben): Typisch sind S-förmige Töpfe mit Knubben am Rand, Schalen und Knickwandgefässe mit Ösenpaar im Bereich des Bodens. Cortaillod-Keramik unterscheidet sich klar von Gefässen anderer Keramikstile (unten): Töpfe, Schüsseln und Schalen mit Schulterabsatz oder Wandknick, an dem sich Knubben- oder Ösen befinden, weisen die Gefässe dem NMB-Stil zu. Andere Gefässe mit Eindruckverzierungen oder eingerolltem Rand erinnern an Vergleichsstücke aus den Regionen Zentralschweiz/Zürich und dem Elsass (Foto: ADB, Badri Redha).

Bisherige Materialanalysen aus Fundstellen des westschweizerischen Mittellandes

Obschon das Auftreten verschiedener Keramikstile am gleichen Fundort in mehreren Publikationen erwähnt wurde, ist dieses Phänomen bisher nur selten näher untersucht worden. Dabei wiesen die früheren archäometrischen oder makroskopischen Materialanalysen in Kombination mit der Analyse der Keramikform bereits auf hochinteressante Phänomene hin: In

Twann am Bielersee wurden z.B. Gefässe erkannt, die im Stil des Néolithique moyen Bourguignon (NMB) geformt sind, dessen Hauptverbreitungsgebiet jenseits des Jura in Ostfrankreich liegt (Abb. 2; *Stöckli 1981, 56–57*). Aufgrund der archäometrischen Untersuchungen ist aber anzunehmen, dass nur zwei der im NMB-Stil geformten Gefässe anderswo, der Grossteil hingegen in den Siedlungen von Twann getöpfert wurde.

Neolithische Keramik besteht aus zwei Komponenten: Einerseits der Matrix – aus

vor dem Brand plastischen Tonmineralien und natürlich im Ton vorkommenden nichtplastischen Anteilen – und der später künstlich zugegebenen Magerung aus nichtplastischen Komponenten. Diese Magerung besteht meist aus Gesteins- oder Mineralbruchstücken, aber auch anderes Material wurde zugeschlagen.

Die Keramik von Twann ist durch drei Grundtypen des Matrixmaterials (silikatisch, karbonatreich (CaO-reich) oder silikatisch-karbonatisch gemischt) und drei Arten von Magerung (silikatischer Gesteinsgrus, Fragmente von Fossilien und Bruchstücke von Kalzit) gekennzeichnet. Weitaus am häufigsten ist die Kombination silikatische Matrix – silikatische Gesteinsbruchstücke (si-si). Seltener kommt

«In Twann wurden Gefässe erkannt, die im Stil des Néolithique moyen Bourguignon (NMB) geformt sind, dessen Hauptverbreitungsgebiet jenseits des Jura in Ostfrankreich liegt.»

die Kombination karbonatische Matrix mit Fossilienbruchstücken (ka-foss) vor, welche wohl aus «pur» verwendetem, fossilienreichem Hauterivienmergel besteht, wie er in der Nähe von Twann vorkommt. Bei einigen Gefässen wurde dem Mergel zusätzlich silikatischer Gesteinsgrus als Magerung zugefügt (ka-foss+si). Zwei Gefässe bestehen aus einer karbonatischen Matrix (fossilienhaltig?) und sind mit Bruchstü-

cken von Kalzit und 1–2% Granit gemagert (ka-Kalzit+si). Einige weitere Gefässe bestehen aus einer silikatisch-karbonatischen Matrix und silikatisch-karbonatischen Magerungsbestandteilen (sika-sika), die aber weder als Fossilienbruchstücke noch als Kalzitfragmente identifizierbar sind (NUNGÄSSER ET AL. 1985). Die archäometrischen Untersuchungen an Keramik aus Siedlungen am Burgäschisee lieferten hingegen keine Hinweise auf nicht lokal oder aus speziellem Material hergestellte Keramik, auch wenn einige Gefässe stilistisch an andere Töpfereistile erinnern (NUNGÄSSER & MAGGETTI 1978).

In den zu verschiedenen Zeiten bewohnten Siedlungen aus Concise kann hingegen eine etwas andere Situation gefasst werden: In einigen Siedlungen dominiert der regionaltypische Cortaillod-Keramikstil, in anderen sind bis zu 50% der Gefässe im Stil des NMB geformt. Obschon die Keramik aus Concise nur makroskopisch untersucht wurde, konnten die drei in Twann beschriebenen Magerungskomponenten erkannt werden: silikatische Gesteinsbruchstücke, Muschel- oder Fossilienbruchstücke und Kalkstein- oder Kalzitfragmente (BURRI 2007). Im Unterschied zu Twann, wo silikatische Tone mit Gesteinsmagerung mit über 95% deutlich überwiegen, gibt es in Concise Siedlungen, in denen Keramik mit Kalkstein-/Muschelmagerung dominiert (bis 70%). Mit Kalzit gemagerte Keramik ist hingegen in beiden Fundstellen selten und übersteigt nie einen Anteil von 5% (BURRI 2007, Katalog; STÖCKLI 2016, 118). Die Keramik der verschiedenen Siedlungen am Lac

Was sind «Fabrikate»?

Die Einteilung in Fabrikate basiert auf petrographisch-mineralogischen Analysen. Wichtige Kriterien für deren Unterscheidung sind die Beschaffenheit und Zusammensetzung der Tonmatrix (Rohton und kleine nichtplastische Komponenten unter 0.02 mm) und der Magerung, d. h. den nicht plastischen Komponenten über 0.02 mm. Zur Unterteilung in Fabrikate können Art, Menge und Verteilung sowie Korngrösse der Magerung, ebenso wie Anteil und Art der nichtplastischen Komponenten in der Tonmatrix genutzt werden. Als karbonatreich (CaO-reich) gilt die Matrix, wenn sie ca. 5–7% CaO aufweist. Diese unterschiedlichen Komponenten führen entsprechend zu Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung der Fabrikate – der Ausgangspunkt für die Untersuchungen mittels pXRF.

de Clairvaux in Ostfrankreich⁷ besteht hingegen nur in Einzelfällen aus silikatischen Tonen und Magerungskomponenten (unter 5%), es dominieren Kalkstein und Kalzit als Magerungszuschlag (PÉTREQUIN & PÉTREQUIN 2015, 402–430). Daher lässt sich aus den bisherigen Untersuchungen schließen, dass in der Dreiseenregion die Gefäße überwiegend aus silikatischen Tonen mit silikatischer Gesteinsmagerung hergestellt wurden, während Kalkstein und Kalzit als Magerungszuschlag vor allem im Jura resp. in Fundstellen aus Ostfrankreich nachgewiesen ist. Diese regionalen Unterschiede in der Zusammensetzung des Töpfertons sind für den Vergleich von Keramikstil und Herstellungspraxis relevant (siehe unten).

Untersuchungen an Keramik aus Siedlungen am Bielersee

Durch die erwähnten Dünnschliff- und XRD-Untersuchungen an der Keramik von Twann wurde festgestellt, dass die makro-

skopische Unterscheidung gewisser Fabrikate schwierig ist. In diesem Fall helfen pXRF-Analysen, die makroskopische Gruppierung zu überprüfen und zu verfeinern. Weiter kann anhand der chemischen Zusammensetzung der Keramik in der Folge eine bessere Auswahl für die detaillierteren Laboranalysen (Dünnschliff, XRD, XRF) getroffen werden.

Die Messungen wurden mit einem pXRF-Analysator Niton XL3t 950 GOLDD+ der Firma Thermo Fisher durchgeführt (Details zu den Gerätespezifikationen und zum Messablauf siehe Anhang). Für die Auswertung wurden die Elemente Si, Ti, Al, Fe, Ca, K, Nb, Zr, Sr und Rb sowie, bei genügend hoher Konzentration, Y, Cr und V verwendet.

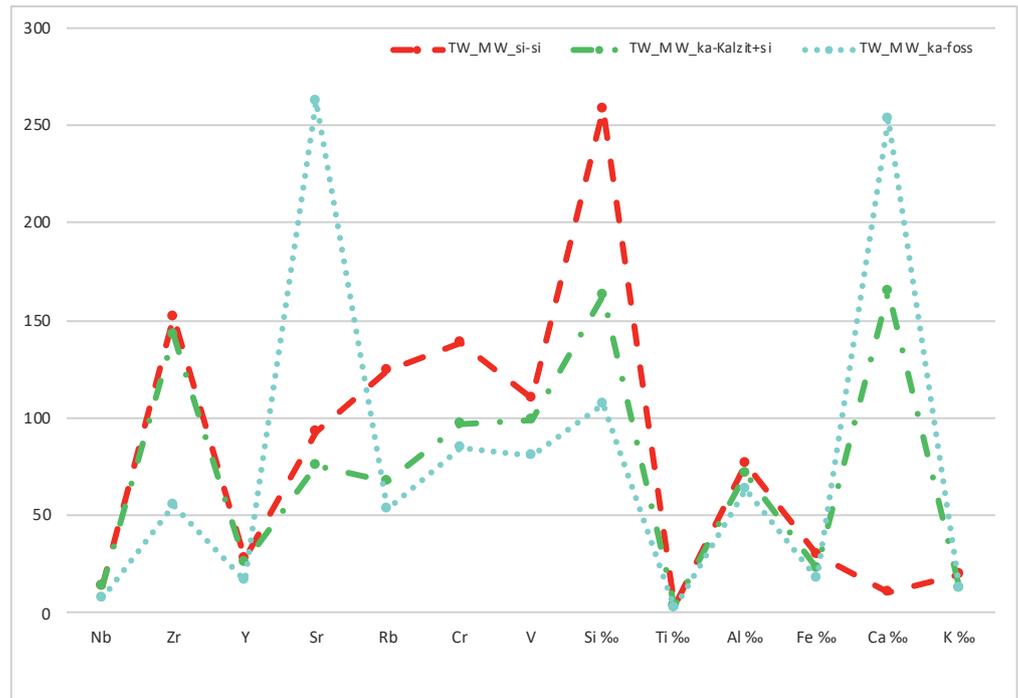
Die pXRF Analysen der mittels Dünnschliffen und XRD charakterisierten Keramik aus Twann zeigen, dass die drei Fabrikate chemisch gut unterscheidbar sind. Für jedes Fabrikat wurde aus den Messungen mehrerer Gefäße ein charakteris-

	TW_si-si (n=39)		TW_ka-Kalzit+si (n=2)		TW_ka-foss (n=6)	
	MW	σ	MW	σ	MW	σ
Nb	13.79	2.02	13.5	0.13	7.19	0.93
Zr	152.05	28.08	142.41	5.73	55.3	9.28
Y	27.74	7.07	25.48	0.23	17.17	1.51
Sr	92.96	33.69	75.05	21.1	261.78	37.15
Rb	124.13	22.22	67.5	15.23	53.45	20.42
Cr	137.9	32.08	96.94	17.22	84.79	10.57
V	110.03	22.22	99.15	11.02	80.59	9.26
Si ‰	258.5	30.5	163	32.5	107.3	27.6
Ti ‰	3.9	0.5	3.9	0.3	2.3	0.4
Al ‰	76.6	12.5	71	2.2	63.8	7.6
Fe ‰	29.7	6.5	22.7	0.9	17.8	3.7
Ca ‰	10.5	6.8	165	4.4	252.8	30.4
K ‰	19.9	3.8	13	0.5	12.4	4.6

Abb. 4: Elementprofile der drei im Dünnschliff definierten Fabrikate aus Twann. Für jedes Fabrikat sind die Mittelwerte der Elementkonzentrationen (MW) und ihre Streuung (σ) angegeben. Werte in Millionstel (ppm) resp. wo angegeben in Promille (‰). Die hervorgehobenen Elementkonzentrationen diskriminieren das Fabrikat von den anderen.

⁷ Fundstellen Clairvaux XIV, Clairvaux VII oder Clairvaux Motte-aux-Magnins (PÉTREQUIN & PÉTREQUIN 2015).

Abb. 5: Elementprofile der drei im Dünnschliff definierten Fabrikate aus Twann: Silikatisches Fabrikat si-si (rot), Fabrikat mit Kalzit ka-Kalzit+si (grün), fossilienreicher Mergel ka-foss (blau). Werte in Millionstel (ppm) resp. wo angegeben in Promille (‰).



tisches Elementprofil erstellt (Mittelwerte und Streuung pro Element).⁸

Die Elementprofile der drei Fabrikate zeigen, dass sich das Fabrikat aus fossilienreichem Mergel durch deutlich mehr Ca und Sr, deutlich weniger Zr und tendenziell weniger Nb, Ti und Fe von den anderen Fabrikaten absetzt. Das Fabrikat mit Kalzit passt von den Zr und Sr Werten gut zum silikatischen Fabrikat, unterscheidet sich aber durch deutlich mehr Ca und weniger Rb (Abb. 4 und Abb. 5).

Weiter zeigt sich, dass das silikatische Fabrikat sehr heterogen zusammengesetzt ist (Abb. 6, unten). Da sowohl die Anteile der Spuren- als auch der Hauptelemente stark variieren ist anzunehmen, dass sowohl der Ton (Matrix) als auch die Magerungskomponenten die Heterogenität verursachen. Dies bedeutet, dass die Rohstoffe entweder primär heterogen zusammengesetzt sind, dass die Tonmischung aus mehreren Rohstoffquellen stammt oder dass die Magerungsanteile variieren. Im Gegensatz dazu, ist die Zusammensetzung der Scherben

aus fossilienreichem Mergel sehr homogen (Abb. 6, oben). Vermutlich sind diese Mergel primär sehr homogen zusammengesetzt, möglicherweise wurden sie aber auch über eine längere Zeitspanne am gleichen Ort abgebaut.

Bei dieser Diskussion muss berücksichtigt werden, dass Keramik kein reines Naturprodukt ist, sondern dass die Töpfer-tonmischung bei der Keramikproduktion aufbereitet wird, indem z.B. grobe Verunreinigungen entfernt, verschiedene Tone gemischt oder Magerungskomponenten zugegeben werden. Eine Herkunftsbestimmung wird durch diesen menschlichen Einfluss also erschwert. Allerdings können einige sinnvolle Annahmen getroffen werden: Das Rohmaterial, zumindest der Roh-ton, wird normalerweise nahe des Herstellungsorts abgebaut worden sein. Zudem werden die Töpfernden eine gut geeignete Töpfer-tonmischung über längere Zeit beibehalten haben. Gefässe, die am gleichen Ort von der gleichen Person oder Gemeinschaft getöpfer wurden, werden deshalb

⁸ Methodik siehe MOMMSEN 1986, 148–153.

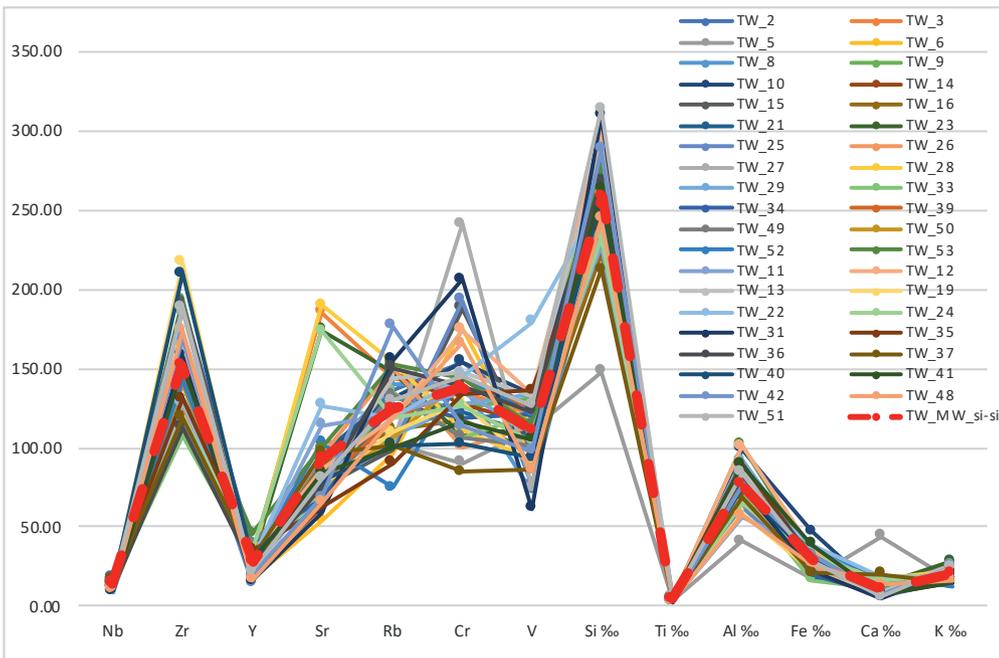
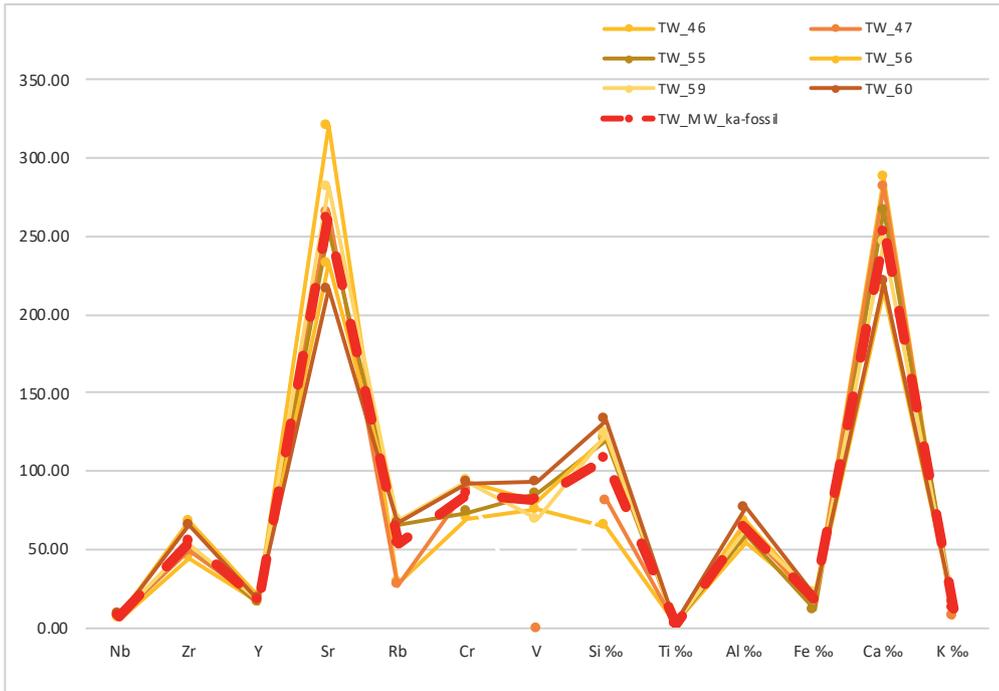


Abb. 6: Variation der Elementkonzentration innerhalb zweier Fabrikate aus Twann.
Oben: Fabrikat aus fossilienreichem Mergel.
Unten: silikatischer Ton mit Gesteinsgrus. Die Mittelwerte aus allen Messungen sind als rote gestrichelte Linie angegeben. Werte in Millionstel (ppm), resp. wo angegeben in Promille (‰).

eine ähnliche Zusammensetzung aufweisen. Herkunftsanalysen basieren grundsätzlich auf der Annahme, dass auch der Umkehrschluss gilt, also dass Gefäße die chemisch ähnlich sind vom gleichen Produktionsort stammen (MOMMSEN 2007, 181).

Trotz dieser theoretischen Ansätze kann die Interpretation der Messergebnisse in der Praxis jedoch komplexer sein. Dies veranschaulicht auch die Beobachtung, dass Töpfereipraktiken angepasst oder kombiniert wurden. Gut beobachten lässt

sich dies an der Keramik aus fossilienreichem Mergel: Wurde bei einigen Gefässen aus Twann der Rohstoff «pur» verwendet (ka-foss), wurde er zur Herstellung anderer Gefässe zusätzlich mit silikatischem Gesteinsgrus gemagert (ka-foss+si), wie es zum Töpfeln der regionaltypischen Keramik aus silikatischem Material üblich war. Diese Kombination zweier Herstellungs-

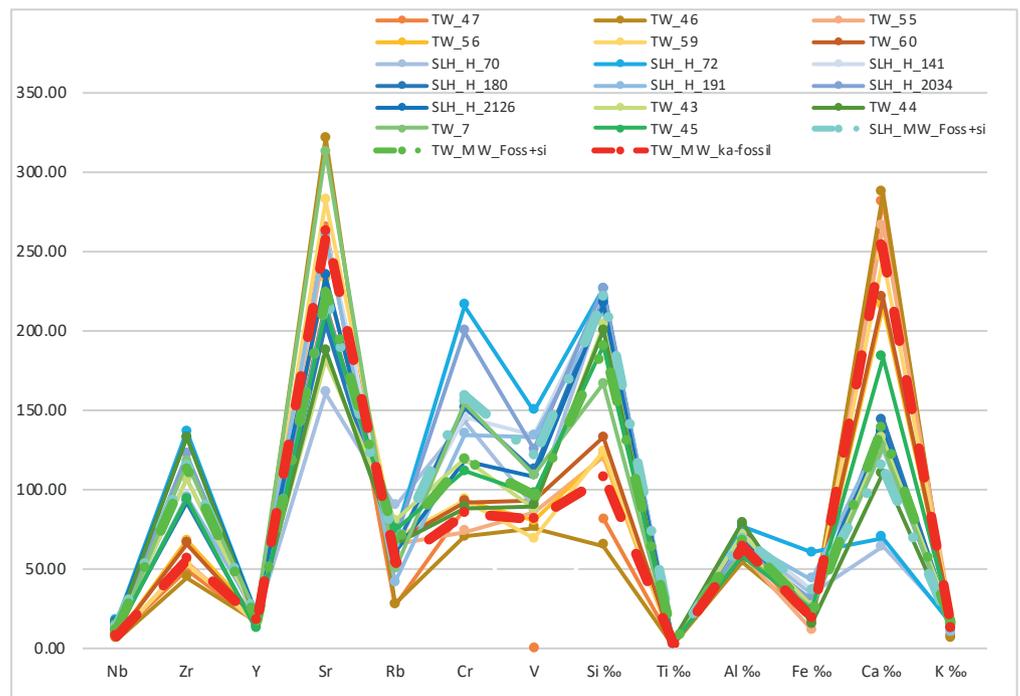
«Das Rohmaterial, zumindest der Rohthon, wird normalerweise nahe des Herstellungsorts abgebaut worden sein.»

praktiken führt zu einer neuen Variante des Töpfertons mit neuen Materialeigenschaften. Interessanterweise wurde dieser sowohl in Twann als auch in zwei Siedlungen am gegenüberliegenden Seeufer in Sutz-Lattrigen verwendet. Abbildung 7 illustriert, wie sich durch die Beigabe von Magerung aus Gesteinsfragmenten die chemische Signatur verändert: Je nach Menge

der beigegebenen Gesteinsfragmente steigen die Werte der für silikatisches Material typischen Elemente wie Zr, Rb, Cr, V und Si an. Da die Beimengungen im Töpferton unterschiedlich verteilt sind und auch nicht immer gleich viel Magerung zugefügt wurde, weisen die Analyseresultate dieser neuen künstlichen Töpfertonmischung relativ grosse Streuungen auf. Zudem werden durch das Mischen von Rohmaterialien aus zwei verschiedenen geologischen Kontexten die charakteristischen Elementprofile «verwischt». Ohne ergänzende mineralogische Untersuchungen sind solche Töpfertone rein chemisch sehr schwierig interpretierbar.

Auf der anderen Seite lassen sich mittels pXRF auch chemische Unterschiede innerhalb des gleichen Fabrikats nachweisen. So unterscheiden sich die Elementprofile der Scherben mit Kalzitmagerung aus Twann und Sutz-Lattrigen leicht aber signifikant (Abb. 8): Während bei den Scherben aus Twann die Zr Werte höher liegen, enthalten die Stücke aus Sutz-Lattrigen mehr Sr, Cr und teilweise mehr V. Makroskopisch lassen sich diese Fabrikate nicht unterscheiden, allerdings zeigen auch die mine-

Abb. 7: Variationsbreite der Elementkonzentrationen von Töpferton aus fossilienreichem Mergel, welcher sowohl «pur» verwendet als auch (künstlich) mit einer Magerung aus Gesteinsgrus angereichert wurde: ka-foss aus Twann (gelb/orangetöne), ka-foss+si aus Twann (grüntöne) und Sutz-Lattrigen (blautöne). Werte in Millionstel (ppm) resp. wo angegeben in Promille (‰).



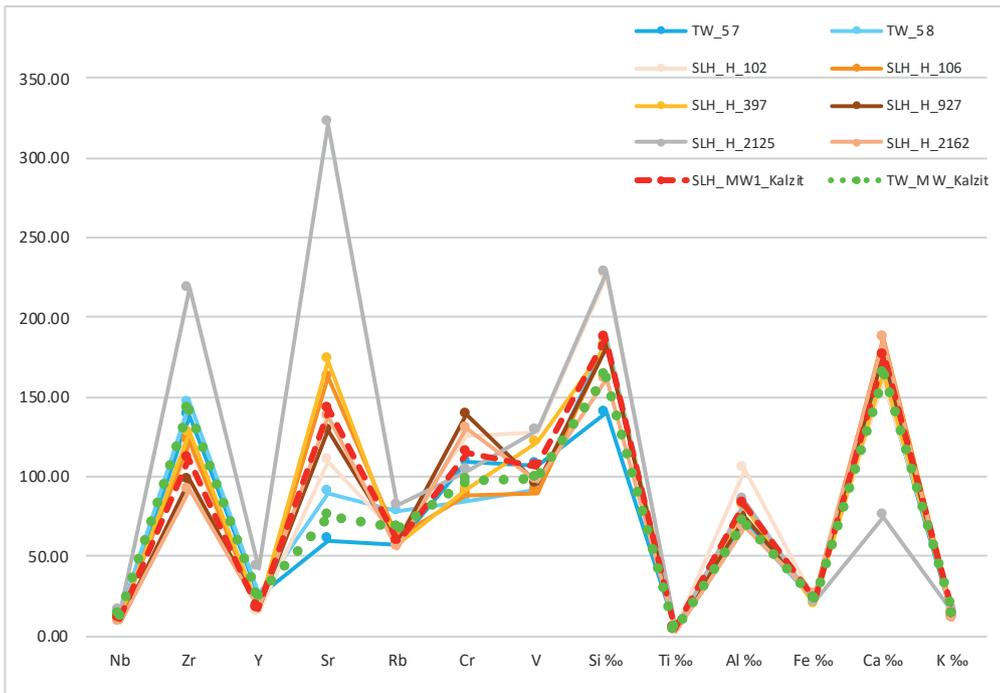


Abb. 8: Elementprofile von Scherben mit Kalzitmagerung aus Twann (blau, Mittelwert grün gepunktet) und Sutz-Lattrigen (gelb und rötöne, Mittelwert rot gestrichelt). Eine Scherbe aus Sutz-Lattrigen weist eine deutlich unterschiedliche Zusammensetzung auf (grau), welche sich auch im Dünnschliff abzeichnet.



Abb. 9: Makrofotos der Bruchflächen der Keramik Sutz-Lattrigen. Links: silikatischer Ton mit Gesteinsbruchstücken. Mitte: fossilienhaltiger Mergel mit Gesteinsbruchstücken. Rechts: silikatisch-karbonatischer Ton mit Kalzitbruchstücken.

ralogischen Untersuchungen Unterschiede auf. Zudem liess sich anhand der pXRF-Analysewerte ein im Dünnschliff dem Fabrikat zugewiesenes Stück als Ausreisser erkennen, für das vermutlich ein anderer Ton verwendet wurde (*Abb. 8, graue Kurve*).

Trotz der erwähnten Einschränkungen gelingt anhand der chemischen Zusammensetzung der Keramik die Differenzierung der drei Hauptfabrikate sowie von Untergruppen dieser Fabrikate; die Differenzierung lässt sich am besten am Verhältnis von Ca zu Sr erkennen (*s. Abb. 10*). Somit lässt sich die Anzahl der für die archäologische Interpretation verwendbaren Proben markant steigern.

PXRF-Analysen bestätigen diverse Formen von Mobilität in Siedlungen am Bielersee

Stilistisch passt die grosse Mehrheit der Keramik aus den Siedlungen des 39. – 36. Jhs. v. Chr. aus Twann, Sutz-Lattrigen und Nidau zum regionaltypischen Cortailod-Stil, es treten aber regelmässig auch Gefässe auf, die in Keramikstilen geformt sind, deren Hauptverbreitung in anderen Regionen liegt (z.B. NMB, Pfyn, Munzingen, siehe *Abb. 2*). Oft sind schon makroskopisch die oben beschriebenen Fabrikate erkennbar (*Abb. 9*), doch teilweise bleibt die Zuweisung schwierig. Insbesondere eine sichere

Differenzierung von scharfkantigen Quarz- und Kalzitfragmenten sowie Mischungen verschiedener Magerungskomponenten bereiten Probleme. pXRF-Analysen in Kombination mit formalen Aspekten ermöglichen nun aber erstmals eine breit abgestützte Untersuchung zu den Herstellungspraktiken von Keramik am Bielersee, welche letztendlich Rückschlüsse auf Mobilität und Beziehungsnetze der neolithischen Gesellschaften ermöglichen.

Die Kombination von pXRF-Analyse und makroskopischer Gruppierung bestätigt, dass die überwiegende Mehrheit der Keramik aus den Siedlungen um den Bielersee aus silikatreichen Tonen hergestellt und mit Gesteinsfragmenten gemagert wurde. Geeignete silikatreiche Lehme (Ton-Sand-Mischungen) und alpines Kristallingestein kommen in der Grundmoräne und ihrem verschwemmten Material in nächster Nähe der Siedlungen vor (NUNGÄSSER ET AL. 1985, 18–19). Sowohl für die Lehme wie auch die Magerungskomponenten kann von relevanten Schwankungen in ihrer Zusammen-

ostfranzösischen NMB-Stil geformt sind, wurden diese Stücke nicht lokal/regional produziert.

Die Kombination von Materialanalyse und Keramikstil deckt mehrere Herstellungspraktiken auf, die Rückschlüsse auf verschiedene Formen von Mobilität erlauben (Abb. 10):

Lokal/regional-typische Herstellungspraxis: Die im Cortailod-Stil geformten Gefässe aus silikatischem Rohmaterial machen den Grossteil der Keramik in allen Siedlungen aus und spiegeln die regionaltypische Herstellungspraxis von Keramik wider.

Nicht lokal/regional produzierte Gefässe: In Twann sowie auch in Sutz-Lattrigen⁹ kommen einzelne Gefässe vor, die mit Kalzit gemagert und im ostfranzösischen NMB-Stil geformt sind. Diese wurden wohl nicht lokal produziert, sondern gelangten im Zuge eines Ortswechsels von Menschen an den Bielersee. Da die Gefässe dieses Fabrikates in Siedlungen zwischen 3820 bis 3566 v. Chr. vorkommen, scheinen Ortsverschiebungen zwischen dem Bielersee und Ostfrankreich während der gesamten Dauer dieser Besiedlungen stattgefunden zu haben.

Lokal produzierte Gefässe nach anderer Herstellungspraxis: In allen Siedlungen von Twann kommen Gefässe im Stil des NMB oder Munzigen vor, die aus lokal vorkommendem, speziell ausgewähltem, fossilienreichem Mergel hergestellt wurden. Sie legen nahe, dass Personen, die in einer Region mit anderer Herstellungspraxis zu Töpfern gelernt haben, in die Siedlungen gekommen sind und dort mit ihrem Know-how Gefässe hergestellt haben. Da die in der Siedlung üblicherweise verwendete Töpfertonmischung wohl andere Materialeigenschaften aufwies als sie gewohnt waren, suchten sie in der Umgebung Rohmaterial, dessen Eigenschaften dem ihnen bekannten Ton besser entsprachen.

In kombinierter Herstellungspraxis getöpferte Gefässe: In allen drei Siedlungen kommen Gefässe vor, bei deren Herstellung

«Der Vergleich von Keramikstil und Fabrikat zeigt, dass in allen Siedlungen der drei Fundstellen um den Bielersee Mobilität von Menschen fassbar ist.»

setzung ausgegangen werden. Einzelne Gefässe wurden hingegen aus fossilienreichem Mergel getöpft, wie er am Jurasüdfuss (z.B. nordöstlich von Twann und bei Ligerz) vorkommt (NUNGÄSSER ET AL. 1985, Abb. 13). Ebenso kommen in Twann und Sutz-Lattrigen vereinzelt Gefässe vor, die mit Kalzit gemagert sind. Da eine Magerung mit Kalzit nicht der regionaltypischen Keramikherstellungspraxis entspricht, sondern vor allem aus Fundstellen im Jura bekannt ist (s. oben), und die Gefässe zusätzlich im

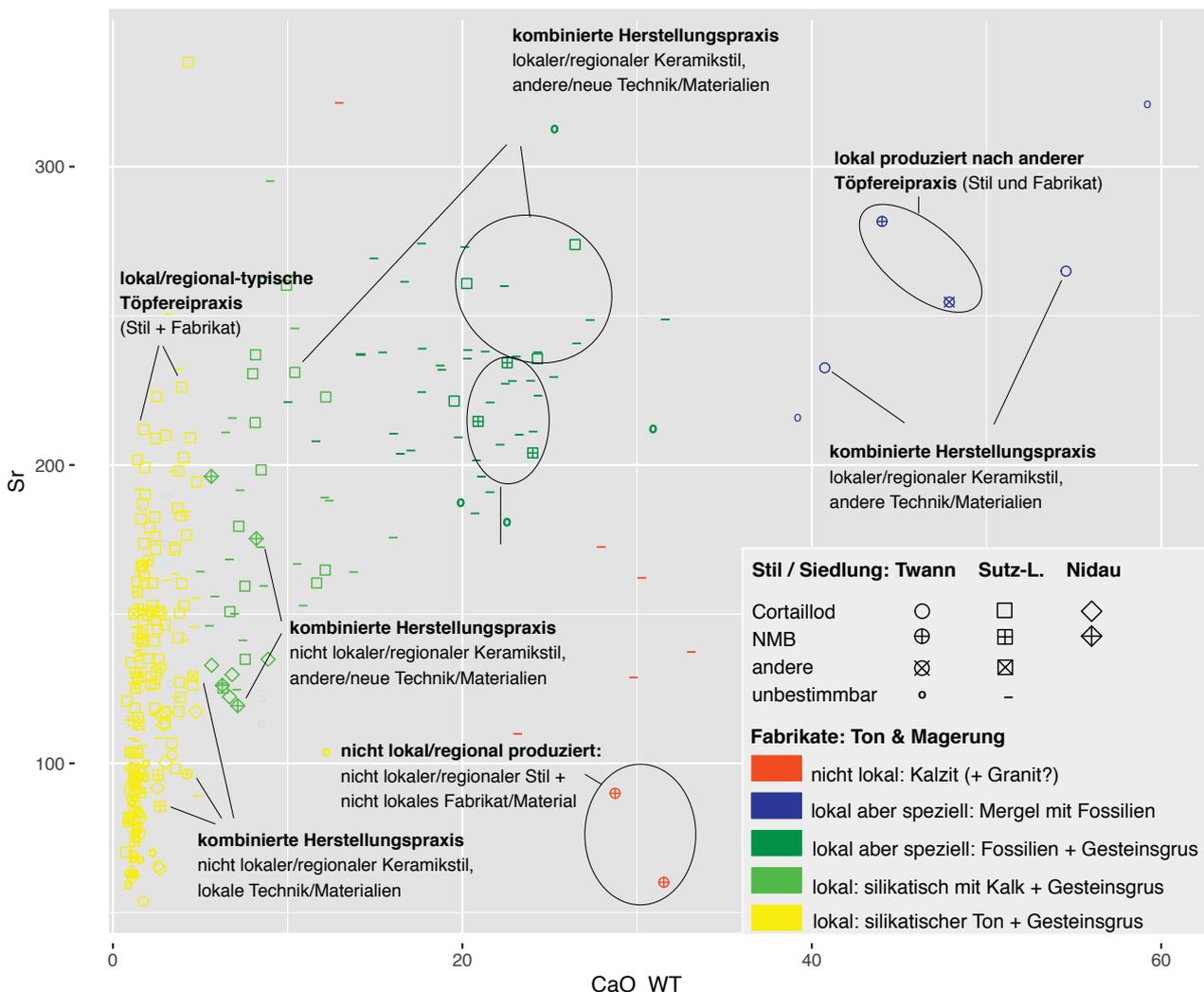
⁹ Aufgrund von Fragmentierung oder uncharakteristischer Form sind die Scherben mit Kalzitmagerung aus Sutz-Lattrigen keinem Keramikstil zuweisbar.

die beiden Töpfereipraktiken kombiniert wurden. Aus fossilienreichem Mergel wurden Gefäße im Cortaillod-Stil getöpft. Manchmal wurde der Mergel auf lokaltypische Weise mit Gesteinsgrus gemagert und daraus Gefäße im NMB-Stil wie auch lokaltypische Cortaillod-Formen hergestellt. Ebenso wurden aus dem lokaltypischen, silikatreichen Töpfer-ton, der mit Gesteinsgrus gemagert worden war, Gefäße im NMB-Stil geformt. Umgekehrt wurden in Twann auch Gefäße im Cortaillod-Stil aus purem fossilienreichem Mergel getöpft. Alle diese Variationen deuten auf engen Kontakt zwischen Töpfernden, die unter-

schiedliche Herstellungspraktiken pflegten. Diese beruhen letztendlich wohl auf der Herkunft aus verschiedenen Regionen (mit unterschiedlicher Töpfereipraxis).

Der Vergleich von Keramikstil und Fabrikat zeigt, dass in allen Siedlungen der drei Fundstellen um den Bielersee Mobilität von Menschen fassbar ist: Einerseits gab es Ortsverschiebungen zwischen Ostfrankreich und dem Bielerseegebiet. Andererseits ist mit – zumindest temporärem – Aufenthalt von Personen, die in Ostfrankreich zu Töpfern gelernt haben, am Bielersee zu rechnen.

Abb. 10: PXRF-Analysen von Keramik aus Twann, Sutz-Lattrigen und Nidau. Das Verhältnis von Ca (Gew%) zu Sr (ppm) trennt die verschiedenen Fabrikate. Die Kombination von Fabrikat und Stil weist auf verschiedene Herstellungspraktiken, die letztendlich auf Mobilität beruhen.



Verdankung

Die Keramikanalysen für den vorliegenden Artikel wurden im Rahmen des MET-Projektes durchgeführt und vom Schweizerischen Nationalfonds (Projektnummer 100011_156205) unterstützt. Wir danken den Projektmitarbeitenden Gisela Thierin-Michael, Vincent Serneels und Ildiko Katona Serneels, welche die im Rahmen des Projektes vorgenommenen Dünnschliffuntersuchungen und Laboranalysen durchgeführt haben für die gute interdisziplinäre Zusammenarbeit und die wertvollen Anregungen und Diskussionen bei der Interpretation der Ergebnisse der archäometrischen und pXRF-Analysen. Ebenso danken wir Thomas Burri für die wertvollen Diskussionen in der Anwendung von pXRF-Analytik sowie für die fachliche Beratung zur Geologie.

Literatur

- BORG, G. und PERNICKA, E. (2017) Goldene Zeiten? – Europäische Goldvorkommen und ihr Bezug zur Himmelscheibe von Nebra. In HARALD MELLER (Hrsg.), *Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte*, Band 96, 111–138.
- BURRI, E. (2007) La station lacustre de Concise 2. La céramique du Néolithique moyen. Analyse spatiale et histoire des peuplements. *Cahiers d'archéologie romande* 109. Lausanne.
- CANN, J. and RENFREW, C. (1964) The Characterization of Obsidian and its application to the Mediterranean Region. *Proceedings of the Prehistoric Society* 30: 111–133.
- CARRER, F. ET. AL. (2016) Chemical Analysis of Pottery Demonstrates Prehistoric Origin for High-Altitude Alpine Dairying. *PLoS ONE* 11(4): e0151442. Doi:10.1371/journal.pone.0151442.
- HAFNER, A., HEITZ, C., STAFFER, R., (2016a) Mobilities, Entanglements, Transformations. Outline of a Research Project on Pottery Practices in Neolithic Wetland Sites of the Swiss Plateau.
- HAFNER, A., PÉTREQUIN, P. and SCHLICHTHERLE, H. (2016b) Ufer- und Moorsiedlungen. Chronologie, kulturelle Vielfalt und Siedlungsformen. In *Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg, Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg* (eds.) 4000 Jahre Pfahlbauten, 59–64.
- HASENFRATZ, A. (1985) Eschenz: Insel Werd 2. Das jungneolithische Schichtpaket III. *Zürcher Studien zur Archäologie*. Zürich: Juris.
- HEITZ, C. (2017) Making things, being mobile: Pottery as intertwined histories of humans and materials. In: HEITZ and STAFFER, *Mobility and Pottery Production. Archaeological and Anthropological Perspectives*, 257–291.
- HEITZ, C. & STAFFER, R. (2016) Fremde Keramik = fremde Menschen? Mobilität und Beziehungsnetzwerke. In: *Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg, Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg* (eds.) 4000 Jahre Pfahlbauten, 150–151.
- HELFFERT, M. (2013) Die portable energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (P-ED-RFA) – Studie zu methodischen und analytischen Grundlagen ihrer Anwendung in der archäologischen Keramikforschung. In: BRITTA RAMMINGER, OLE STILBORG, MARKUS HELFFERT, *Naturwissenschaftliche Analysen vor- und frühgeschichtlicher Keramik III. Methoden, Anwendungsbereiche, Auswertungsmöglichkeiten*, 14–47.
- HELFFERT, M. und BÖHME, D. (2010) Herkunftsbestimmung von römischer Keramik mittels portabler energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (P-ED-RFA) – erste Ergebnisse einer anwendungsbezogenen Teststudie. In: BRITA RAMMINGER und OLE STILBORG, *Naturwissenschaftliche Analysen vor- und frühgeschichtlicher Keramik I. Methoden, Anwendungsbereiche, Auswertungsmöglichkeiten*, 11–30.
- HUNT, A. M. W. (Ed.) (2017) *The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis*.
- LÜNING, J. (1967) Die Michelsberger Kultur. Ihre Funde in zeitlicher und räumlicher Gliederung. *Bericht der Römisch-Germanischen Kommission* 48, 1–350.
- MAGGETTI, M. (2001) Chemical Analyses of Ancient Ceramics: What for? *Chimia* 55, 923–930.
- MAIER, R.A., SCHMID, E., (1958) Neufunde aus der «Michelsberger» Höhensiedlung bei Munningen, Ldkrs. Freiburg i.Br. *Badische Fundberichte* 21, 7–76.
- MATUSCHIK, I. (2011) Siedlungsarchäologie im Alpenvorland XII. *Hornstaad-Hörnle I–VI*.

- Besiedlungsgeschichte der Fundstelle und die Keramikentwicklung im beginnenden 4. Jahrtausend v. Chr. im Bodenseeraum.
- MOMMSEN, H. (1986) Archäometrie. Neuere naturwissenschaftliche Methoden und Erfolge in der Archäologie. Stuttgart.
- MOMMSEN, H. (2007) Tonmasse und Keramik: Herkunftsbestimmung durch Spurenanalyse. In: Wagner, G. A. (Hrsg.) Einführung in die Archäometrie. Springer, 179–192.
- NISBET, E. G., DIETRICH, V. and ESENWEIN, A. (1979) Routine trace element determination in silicate minerals and rocks by X-ray fluorescence. *Fortschr. Miner.* 57(2): 264–279.
- NUNGÄSSER, W., MAGGETTI, M. und STÖCKLI, W.E. (1985) Neolithische Keramik von Twann – Mineralogische und Petrographische Untersuchungen. *Jahrb. Schweiz. Ges. Für Ur-Frühgesch.* 68, 7–40.
- NUNGÄSSER, W., und MAGGETTI, M. (1978) Mineralogisch-petrographische Untersuchung der neolithischen Töpferware vom Burgäschisee. *Bull. Société Fribourgeoise Sci. Nat.* 67, 152–173.
- PÉTREQUIN, P. et PÉTREQUIN, A.-M. (2015) Clairvaux et le «Néolithique Moyen Bourguignon». *Besançon: Presses universitaires de Franche-Comté.*
- POTTS, P. J. and WEST, M., (Eds.) (2008) *Portable x-ray fluorescence spectrometry: capabilities for in situ analysis.* Cambridge, RSC Publishing.
- RADIVOJEVIĆ, M. ET AL. (2018) The Provenance, Use, and Circulation of Metals in the European Bronze Age: The State of Debate. *Journal of Archaeological Research*, <https://doi.org/10.1007/s10814-018-9123-9>.
- SCHWEITZER, J., (1987) Le site Michelsberg de Didenheim. *Alsagraphic, Riedisheim.*
- SERNEELS, V. (1993) Archéométrie des scories de fer. *Recherches dur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. Cahiers d'Archéologie Romande* 61.
- SHEPARD, A. O. (1956) *Ceramics for the Archaeologist*, Washington.
- STAPFER, R. (2017) Special pottery in 'Cortailod' settlements of Neolithic western Switzerland (3900–3500 BC). In: HEITZ, C. AND STAPFER, R. (eds.) *Mobility and Pottery Production. Archaeological & Anthropological Perspectives*, 141–167.
- STAPFER, R. ET AL. (in Vorbereitung) Interdisciplinary examinations carried out on heterogeneous coarse ceramics from Neolithic lakeside settlements: Analysis strategy and preliminary results from a test series using pXRF
- STÖCKLI, W.E. (1981) *Die Cortailod-Keramik der Abschnitte 6 und 7.* Bern.
- STÖCKLI, W.E. (2009) *Chronologie und Regionalität des jüngeren Neolithikums (4300–2400 v. Chr.) im Schweizer Mittelland, in Süddeutschland und in Ostfrankreich: aufgrund der Keramik und der absoluten Datierungen, ausgehend von den Forschungen in den Feuchtbodensiedlungen der Schweiz.* Antiqua 45.
- STÖCKLI, W. E. (2016) *Urgeschichte der Schweiz im Überblick (15000 v. Chr. – Christi Geburt): Die Konstruktion einer Urgeschichte.* Antiqua 54.
- THIERRIN-MICHAEL, G. ET AL. (2003) Pottery Production and Its Diffusion – Chemical and Petrographical Analyses of Early Medieval Pottery from Develier-Courtételle and their Historical Implications. In: SIMONPIETRO DI PIERRO, *Ceramic in the Society: Proceedings of the 6th European Meeting on Ancient Ceramics 2001, Fribourg*, 277–288.
- TITE, M. S. (2017) Chapter 2: History of scientific research. In: ALICE M. W. HUNT, *The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis*, Oxford 2017, 7–15.
- VOGT, E., (1934) *Zum schweizerischen Neolithikum.* Germania 18, 89–94.
- WAGNER, G. A. (Hrsg.) (2007) *Einführung in die Archäometrie.* Springer.
- WIECHMANN, A., (1998) *Holtzheim (Bas Rhin) – die jungneolithische Keramik der Fundstelle «Les Abattoires»*
- WILLIAMS-THORPE, O. (2007) Obsidian in the mediterranean and the near east: A provenancing success story. *Archaeometry* 37(2): 217–248.
- WINIGER, J. (1971) *Das Fundmaterial von Thayngen – Weier im Rahmen der Pfyner Kultur.* Basel.

Regine Stapfer



Regine Stapfer studierte Ur- und Frühgeschichte, Schweizergeschichte und Klassische Archäologie an der Universität Bern. In ihrer Lizentiatsarbeit wertete sie neolithische Keramik aus Sutz-Lattrigen aus. Danach leitete sie die Ausgrabung der neuzeitlichen und römischen Bäder im «Limmatknie» des Badener Bäderquartiers. Anschliessend war sie als Assistentin am IAW der Universität Bern tätig. Seit 2017 leitet sie im Archäologischen Dienst des Kantons Bern das Ressort Prähistorische und Unterwasserarchäologie. In ihrer laufenden Dissertation beschäftigt sie sich im Rahmen des MET-Projektes am IAW der Universität Bern mit Kontaktnetzen und Mobilität anhand von Keramikstilen im west- und zentralschweizerischen Mittelland, wobei pXRF-Analysen einen Schwerpunkt bilden.

Albert Hafner



Albert Hafner lehrt seit 2012 an der Universität Bern und ist Direktor am Institut für Archäologische Wissenschaften und Mitglied des Oeschger Centre for Climate Change Research (OCCR). Forschungsschwerpunkte sind neolithische und bronzzeitliche Seeufersiedlungen und alpine Archäologie. Er war bis 2012 beim Archäologischen Dienst des Kantons Bern tätig.

Martin Hinz



Martin Hinz studierte in Berlin und Kiel Ur- und Frühgeschichte, Klassische Archäologie, Mittlere und Neuere Geschichte, Informatik und Europäische Volkskunde/Kulturanthropologie. Er untersuchte bronzzeitliche (Magisterarbeit) und jungsteinzeitliche (Doktorarbeit) kulturelle Komplexe mit einem Fokus auf quantitative und räumlich-landschaftsarchäologische Aspekte und ist an den statistischen Auswertungen im Rahmen des MET-Projektes beteiligt. Seit September 2018 ist er Oberassistent am IAW der Universität Bern, Abteilung Prähistorische Archäologie.

Caroline Heitz



Caroline Heitz studierte Ur- und Frühgeschichte, Provinzialrömische und Naturwissenschaftliche Archäologie, Ethnologie und Osteuropäische Geschichte an der Universität Basel. Von 2014–2018 war sie Assistentin am IAW der Universität Bern und doktorierte im Rahmen des MET-Projektes. In ihrer Promotionschrift erarbeitete sie einen methodologischen Ansatz der erlaubt, naturwissenschaftliche und geisteswissenschaftliche, sowie qualitative und quantitative Methoden von Keramikanalysen zu kombinieren und zur Untersuchung von Mobilität, Verflechtungen und Transformationen in neolithischen Siedlungsgemeinschaften des nördlichen Alpenvorlandes einzusetzen. Seit 2018 arbeitet sie an einem PostDoc-Projekt im Rahmen des interdisziplinären SNFS-Forschungsprojektes «Quantifying Human Impact», das am OCCR der Universität Bern angesiedelt ist.

Anhang 1: Gerätespezifikationen

- Messgerät: Niton XL3t 950 GOLDD+ von der Firma Thermo Fisher.
- Anregungsquelle: 2W Röntgenröhre mit Ag-Anode (50kV, 200 μ A).
- Messfenster: Durchmesser von 8 mm.
- Kalibration: Das Gerät wurde bei Thermo Fisher Scientific Niton Europe GmbH in München (D) mit den Modi «Mining», «Soil» und «Alloy» kalibriert. Zusätzlich wurde die Standard-Elementpalette in den Modi «Mining» und «Soil» resp. die Applikation «Test all Geo» mit Y, Ce, La, Th, Hg und U erweitert. Im Modus «Mining» werden die Elemente Ce, La, Ba, Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Mo, Nb, Zr, Y, Sr, U, Rb, Th, As, Se, Bi, Au, Pb, Hg, W, Zn, u, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti, Ca, K, Al, P, Si, Cl, S, Mg gemessen. Im Modus «Soil» resp. «Test all Geo» zusätzlich Sc, Cs, Te, Re, Ta, Hf.
- Nachjustierung: die Werkskalibration der Modi «Mining» und «Soil» wurde von der Firma Analyticon Instruments GmbH in Rosbach v. d. H. (DE) überprüft und nachjustiert auf «Mining-Archäometrie» anhand zertifizierter Referenzstandards.

Anhang 2: Definiertes Messverfahren

Um möglichst viele «Störfaktoren» auszuschliessen und um die Daten verschiedener Messserien vergleichen zu können, wurden folgende Rahmenbedingungen definiert (Stapfer et al. in Vorbereitung):

- Messzeit: 2 min.
- Probenvorbereitung: Frischer Bruch (mit Beisszange erzeugt), um Bodenlagerungseffekte/Kontamination zu vermeiden und ein repräsentatives Gemisch des Töpfertons (Matrix und Magerung) zu erfassen.
- Feinkalibration: Zur Verminderung des Effektes unebener Bruchflächen wurden die Messungen pro Element mit den Korrekturfaktoren aus der empirischen Feinkalibration multipliziert. Die empirische Feinkalibration für den verwendeten Analysator des IAW Bern wurde im März 2016 von R. Stapfer unter der Leitung von M. Helfert an der Goethe Universität in Frankfurt a. M. durchgeführt. Verwendet wurde dazu römische Keramik aus Groß-Gerau. Zur Methode siehe Helfert und Böhme 2010, 141–143.
- Repräsentativität: Zur Steigerung der Repräsentativität der Messung sowie zur Erkennung von Fehlmessungen wurden mindestens 3 Stellen pro Gefäss analysiert, die Messergebnisse danach verglichen und nach Ausschluss von Ausreissern oder erkannten Fehlmessungen gemittelt.
- Langzeitmonitoring: Zur Erkennung allfälliger Veränderung im Messverhalten des Analysators wurde bei jeder Messserie eine Referenzprobe aus homogenem Töpferton (Bodmerton) mitgemessen.