

GEBEN UND NEHMEN

**Eine wirtschaftshistorische Studie zum neolithischen Hornsteinbergbau
von Abensberg-Arnhofen, Kr. Kelheim (Niederbayern)
[in IV Bänden]**

BAND I: Bergbau

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
im Fach Ur- und Frühgeschichte
an der Philosophischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Georg Roth
aus Forchheim in Oberfranken

Köln im März 2008

In Dankbarkeit gewidmet meinem Vater

Horst Adolf Julius Roth

*(*20.02.1937 Bunselwitz, Kr. Schweidnitz, Schlesien)*

Dankes- und Geleitworte als Vorwort

Meine Doktorarbeit wurde erst durch die Unterstützung, die Hilfe und den Zuspruch zahlreicher Menschen möglich. Entscheidend für ihr Zustandekommen war die jahrelange hingebungsvolle Unterstützung durch meinen Vater, Horst Roth. Ihm sei daher diese Arbeit in Dankbarkeit gewidmet.

Auf wissenschaftlicher Seite möchte ich mit den Männern beginnen, die dem "lithisch" völlig unbedarften *Studenten* zum ersten Mal das Verständnis von Steinartefakten lehrten. Mein Dank gilt hier meinen Erlanger Dozenten PD Dr. Wolfgang Weissmüller (†) und Prof. Dr. Ludwig Reisch (Erlangen) und meinem Kölner Lehrer Prof. em. Dr. Gerhard Bosinski (Neuwied-Segendorf).

Wie man von den einzelnen Steinen zu *historischen Aussagen* und damit wieder zum Menschen hinter den Artefakten findet, das lehrte mich der Betreuer meiner Magisterarbeit und gleichzeitige Doktorvater dieser Arbeit, Prof. Dr. Andreas Zimmermann (Köln). Ihm danke ich für das Vertrauen, das er in mich setzte, da er mir die wirtschaftshistorische Bearbeitung des Themenkomplexes Arnhofen übertrug. Seine stete Hilfsbereitschaft und seine methodischen Anregungen waren das Salz und die Hefe dieser Studie.

Im Folgenden werde ich entsprechend der Entstehungsgeschichte der Arbeit vorgehen, was auch in etwa ihrem Aufbau entspricht. An erster Stelle geht mein Dank an die Deutsche Forschungsgemeinschaft für die jahrelange Unterstützung des Forschungsprojektes Arnhofen.

Zugleich richtet er sich an die Mitarbeiter der *Kreisarchäologie Kelheim*. Für die Einführung in den Umgang mit digitalen Plänen, die die Grundlage meiner späteren GIS-Kenntnisse bildeten, sowie die Überarbeitung zahlreicher digitaler Grabungspläne und für zahllose digitale Fotografien danke ich dem Grabungstechniker Herrn Klaus Eisele. Zu Dank verpflichtet bin ich Herrn Kreisarchäologen Prof. Dr. Michael-Maria Rind, der die Überlassung der Grabungsdokumentation ermöglichte und mich nach dem Projektende stets über die weiteren Arbeiten vor Ort in Arnhofen informierte. Er übernahm auch entgegenkommenderweise den Rücktransport der in Köln bearbeiteten Funde nach Kelheim.

Außerdem danke ich den vielen hilfreichen Händen des *Teams der Kreisarchäologie Kelheim* für ihre Mitarbeit bei Ausgrabung und Fundbearbeitung, und hier besonders Frau Christa Steiger-Kormann (Kelheim). Zahlreiche Studierende – nicht nur der Ur- und Frühgeschichte – von den Universitäten Dijon, Erlangen, Göttingen, Kiel, Köln, Leipzig, Münster und Regensburg arbeiteten so manchen Tag in der glühenden Sonne des Sommers 2001 im Sand von Arnhofen; ihnen allen meinen Dank für ihren Einsatz.

Für baggertechnisches Fingerspitzengefühl bei der Grabungsarbeit sowie die stets hilfsbereite und entgegenkommende Organisation des eigenen Kiesabbaus danke ich dem Besitzer der Grabungsflächen, Herrn Isidor Brandl aus Pullach.

Den zahlreichen *Besuchern* auf der Grabung in Arnhofen, unter anderem aus Abensberg, Erlangen, Frankfurt, Kelheim, Krakau, Maastricht, München, Paris, Poznan und Regensburg, Wissenschaftlern wie Laien, sei für ihre Anregungen und Hinweise gedankt. Schließlich bedanke ich mich bei meiner Gastgeberin im Dorf Arnhofen, Frau Irmgard Maria Attenberger, für ihre Gastfreundlichkeit und ein wenig Lebensweisheit.

Zurück in Köln brauchte "Arnhofen" ein *Zuhause*. Hier gilt mein Dank den Leitern der Afrika-Forschungsstelle des Kölner Institutes, Herrn Dr. Rudolf Kuper und PD Dr. Hans-Peter Wotzka. Ersterer überließ mir 2001 einen Arbeitsplatz in den Räumen der Forschungsstelle, letzterer bot dort bis 2004 in Zeiten knappster Räumlichkeiten den Funden einen Lagerplatz, sowie mir und den studentischen Projekthilfskräften einen Schreibtisch. Für ihren Einsatz und ihren Fleiß bei der Fundaufnahme von abertausenden meiner "Steinchen" danke ich meinen damaligen studentischen Hilfskräften im Arnhofen-Projekt: Marcel Bradtmöller M.A. (Neanderthalmuseum Mettmann), Stephan Niedoba (Köln), Thomas Richter (Hürth) und Christiane Schmidt M.A. (Uni Jena). Aus meiner Zeit in "Afrika" wird mir zudem die Hilfsbereitschaft von Dr. Karen Kindermann, Dr. Heiko Riemer, Dr. Tilman Lenssen-Erz, Dr. Jörg Linstädter und Dr. Hubert Berke sowie all den anderen "AfrikanerInnen" in angenehmer Erinnerung bleiben.

Unvergesslich bleibt mir das *Vertrauen*, das Herr Rolf Bach aus Saal an der Donau mir entgegenbrachte, als er mich 2003 bei einem Forschungsaufenthalt wochenlang in seinem Haus Funde aus seiner umfangreichen Privatsammlung zur Prähistorie der Gemeinde Saal bearbeiten ließ. Ihm verdanke ich nicht nur Teile der Datengrundlage für das Kapitel zur Verarbeitung des Arnhoferer Hornsteins, sondern auch einen detaillierten Einblick in die prähistorische materielle Kultur sowie die Besiedlung zwischen Kelheim und Arnhofen. Besonders die Kenntnis der letzteren eröffnete mir das Verständnis für die Struktur der neolithischen Siedlungslandschaft in der weiteren Bergwerksumgebung. Hier lehrte den Magister einer, dessen Liebe zur Archäologie nur noch von seinen Kenntnissen derselben übertroffen wird.

Am Verständnis der theoretischen Aspekte der *Wirtschaftsgeschichte* hatten die jahrelangen Diskussionsrunden mit meinen Lesekreisgenossen Dipl. Architekt Axel Dennicke, Daniel Postrak und Stefan Schüller (alle Köln) entscheidenden Anteil: meinen Dank Genossen!

Bei den folgenden *Bearbeitungsphasen* halfen Dr. Thomas Frank und Dr. Karl-Peter Wendt (beide Uni Köln) mit zahlreiche Antworten auf Fragen zu GIS- und Softwareproblemen – ihnen meinen herzlichen Dank. Besonders danke ich Dr. Erich Classen (BLfD, Außenstelle Ingolstadt) für seine Hilfe bei den Triangulationen und Frau Dr. Joanna Pyzel (Uni Gdansk/PL) für die wertvollen Hinweise zur Kombination unterschiedlicher GIS-Software.

Dr. Bernhard Weninger vom Kölner *C¹⁴-Labor* hielt mich über die neuesten Datierungen der Arnhoferer Proben in seinen Rohren stets auf dem Laufenden. Erst durch viele fruchtbare Diskussionen zur Bedeutung der Daten wurde aus Zahlenreihen ein chronologisches Modell mit Hand und Fuß, wofür ihm herzlich gedankt sei.

Bei den Besuchen der Ausgrabung in *Tesetice* im schönen Mähren in den Jahren 2004 und 2005, bei denen Dr. Inna Mateiciucova (Uni Brno) meine Gastgeberin war, konnte ich wertvolle Kontakte knüpfen und wichtige Informationen sammeln: dafür meinen herzlichen Dank! Beim Besuch im Jahr 2004 führte mich Dr. Martin Oliva vom Anthropos Institut Brno über seine Ausgrabungen auf dem mesolithischen bis latenézeitlichen Hornsteinbergwerk von Krumlovsky les, östlich von Moravsky Krumlov. Für die vielen neuen Einblicke in die Montanarchäologie, die ich dabei gewann, bin ich Dr. Oliva sehr dankbar.

Die Fitness für jahrelange Schreibtischtäterschaft verdanke ich den *Capoeiristas* vom Verein Compañia Pernas pro Ar e.V. (Köln). Hier geht vom “Mestre dos Magos“ ein dickes “Obrigado“ an meine Lehrer, an erster Stelle Contramestre “Porquinho“ (Nayro Lopez de Oliveira/Köln), sowie an meine Freundinnen und Freunde – besonders an den Mann mit den technischen Tipps “Rino“ (Dipl. Ing. Krisztian Lörinczi/Köln). Ich bedanke mich für all die physische wie verbale Schlagfertigkeit sowie die körperliche und intellektuelle Gelenkigkeit, die ich durch sie und mit ihnen erlernen durfte: *Axe!*

Die *Karten* des vierten Kapitels gäbe es nicht in dieser Form, hätten nicht zahlreiche Freundinnen und Freunde, Kolleginnen und Kollegen freundlicherweise unpublizierte Daten und/oder für mich unzugängliche Literatur zur Verfügung gestellt. Hier danke ich Dr. Utz Böhner (Hannover), Ingo Bürger M.A. (Bamberg), Dr. Ulla Eisenhauer (Uni Fr. a. M.), Dr. Birgit Gehlen (Uni Köln), Dr. Inna Mateiciucova (Uni Brno/CR), Joachim Pechtl M.A. (Uni Heidelberg), Dr. Silvi-ane Scharl (FU Berlin), Prof. Dr. Gerhard Trnka (Uni Wien) und Dr. David Underwood (Slough/GB).

Mein *Verständnis* für die bei den Ausgrabungen erfasste Zeit des frühen bayerischen Jungneolithikums verdanke ich dessen profundestem Kenner, meinem Freund Ingo Bürger M.A. (Erlangen), der mir zudem in all den Jahren stets mit Rat und Hilfe zur Seite stand, wenn sich am Telefon wieder ein Spezialwunsch zu unzugänglich publizierter lokaler Literatur mit den Worten anbahnte: “Hi, here’s Evil again“.

Für *Antworten* zu und Hilfe bei Problemen mit der Oberflächenkostenanalyse danke ich Prof. em. Dr. Waldo Tobler (Berkeley, USA) und Prof. Dr. Jens Andresen (Aborg, DK). Für Gespräche, die meine Kenntnisse des älteren bayerischen Neolithikums bereicherten, bin ich Dr. Silvianna Scharl und Stephan Suhrbier M.A. (beide FU Berlin) dankbar.

Gute Argumente für die Ausdehnung des Bergwerkes von Arnhofen ergaben sich aus der Entzerrung von Luftbildern, bei der freundlicherweise Daniela Euler M.A. half (Universität Fr. a. M.). Für ihre wegweisenden Tips beim Einsatz der *Punktfeldstatistik* geht mein Dank an die Professoren Dr. Adrian Baddeley (Adelaide, Australien) und besonders an Dr. Dietrich Stoyan (Bergakademie Freiberg), der mit wertvollen Hinweisen dem interessierten Amateur erst das Verständnis dieser Methode eröffnete.

Kritische *Diskussionen* der Ergebnisse, wichtige Hinweise und Hilfen kamen von meinen – nicht nur Kölner – Freundinnen und Freunden, Kolleginnen und Kollegen (in alphabetischer Reihenfolge): Dr. Ulla Eisenhauer (Uni Fr. a. M.), Anna-Leena Fischer M.A. (Uni Köln.), Kerstin Hofmann (DAI), Wenke Hoyer M.A. (Uni Basel/CH), Maha Ismail M. A. (Uni Köln.), Dr. Tim Kerig (Uni Köln), Dr. Carsten Mischka (Uni Kiel), Kathrin Nowak M. A. (Uni Köln.), Sara Schiesberg M. A. (Uni Köln.) und Tanja Zerl M.A. (Uni Fr. a. M.). Der Sonderpreis für jahrelanges lustiges Büroleben gebührt dabei meinem Schreibtischnachbarn Guido Nockemann M.A. (Uni Köln).

So manch hölzerne Passage und orthographisch unhaltbaren *Zustand* konnten meine Korrekturleserinnen und -leser vor dem Auge der Leser retten. Dafür geht ein dickes Dankeschön an Dr. Ulla Eisenhauer, Dr. Nicole Rupp, Tanja Zerl M.A. (alle Uni Fr. a. M.) und Dipl. RWL Anne Paschke (Köln).

Der zweite *Referent* dieser Arbeit, PD Dr. Thorsten Uthmeier (Uni Köln), erörterte mit mir über Monate hinweg Aufbau und Inhalt der Arbeit und gab viele wertvolle Hinweise, wofür ich ihm hier danke. Mein besonderer Dank für den professionellen “mental support“ in der wichtigen Endphase geht an Frau Silvia Lamaye (Köln).

Der Dankeskreis schließt mit dem Mann, der jeden einzelnen Buchstaben dieser Arbeit nochmals auf Rechtschreibfehler überprüfte, meinem Vater Horst Roth (Forchheim/Oberfr.).

Was noch an heimlichen *Fehlern*, unschönen Ungereimtheiten, redaktionellen Unschönheiten oder schlichtem Pfusch schließlich auf den folgenden knapp tausend Seiten zu finden ist, kann nur das Ergebnis meines Unvermögens sein.

Beinah hätt' ich's übersehen! Mit fünfundneunzig Prozent Wahrscheinlichkeit – getestet hab' ich's nicht – sind auch hier bestimmt liebe, nette, freundliche und hilfsbereite Menschen vergessen worden. An sie gehen mein Dank sowie meine Bitte um Entschuldigung für's Vergessen.

Der angesichts der Seitenberge irritierte *Leser* möge dem Verursacher dieses "Blätterwaldes" verzeihen. Viel Kraft und jahrelange Arbeit stecken in diesen Seiten. Der Grund für meine ausführlichen Arbeitsschrittbeschreibungen liegt viele Jahre zurück. Im Grundstudium blieb ich nach der Lektüre so manchen spannenden Artikels ratlos zurück, weil die interessanten Ergebnisse nicht mit einer ebenso aufschlussreichen Erklärung der verwendeten Methoden verbunden waren. Das sollte meinen Lesern später nicht passieren, schwor ich mir. Der oben aufgeführte Kreis von Spezialisten, der bei der Entstehung dieser Arbeit hilfreich war, mag die eine oder andere Passage für etwas zu lang geraten halten. Mein Anliegen war es, das Zustandekommen meiner Ergebnisse auch für die Nichtspezialisten transparent und nachvollziehbar zu halten. Wenn meine Leser dann auch nur den einen oder anderen Abschnitt dieser Studie für historisch anregend, methodisch hilfreich oder gar wissenschaftlich spannend halten, so habe ich alles erreicht, was ich mit dieser Arbeit angestrebt habe.

Nach all den mehr persönlichen Worten zur *Entstehungsgeschichte* dieser Doktorarbeit fehlen noch ein paar zu ihrem historischen Rahmen – so wie ich ihn sehe.

Die Arbeit entstand in den Jahren, in denen vom Neoliberalismus verführte politische Entscheidungsträger um mich herum Bildung zur Ware, wissenschaftliche Ausbildung zur hoch-Schule, Wissenschaft zum Lieferanten künftiger Verwertbarkeit und archäologische Denkmalpflege zur "verschlankten" Dienstleistung degradierten (2001 bis 2008). Eine Gesellschaft die den damit verbundenen neoliberalen Versprechungen Glauben schenkt, ist wie der Esel, der sich die Stange mit der unerreichbaren Möhre selbst auf den Scheitel bindet, um ihr dann selbstvergessen nach zu traben. Hoffentlich brauchen diese Fehlentwicklungen nicht erst den archäologisch-historischen Rückblick, um als Irrweg erkannt zu werden.

Um sich die Folgen dieser meiner Meinung nach fehlgeleiteten Politik vorzustellen, bedarf es keiner großen Phantasie. In wenigen Jahren werden fast nur noch die Kinder von Besserverdienenden die "Orchideenwissenschaft" Archäologie bis zum Doktorgrad absolvieren und ihre Inhalte bestimmen.

Die Qualität selbstbestimmter und freier akademischer Bildung wird von einem Zwangskorsett aus autoritären Ausbildungsregelungen erstickt werden und dadurch auf das Niveau intellektuell fruchtloser "Schlüsselkompetenzen" herabsinken. Die Studierenden werden zu hoch-Schülern degradiert worden sein, die sich aufgrund von Studiengebühren mit Kunden und das Studium mit einer Tretmühle verwechseln. Professoren, die sogenannten Reformen Glauben schenkten, werden ihre Fächer bei den "Abgewickelten", "Eingesparten" und "Künftig Wegfallenden" wiederfinden. Und Denkmalpfleger, die, statt für die Archäologie und gegen Knebel-Einsparungen zu kämpfen, auf ihrem Bürostuhl resignierten, werden vor allem mit dieser Entscheidung in die Annalen eingehen.

Wer bei diesen Zeilen an überzogene Polemik und unangebrachten Pessimismus denkt, der möge sie ganz einfach in nur zehn Jahren, im Jahre 2018, noch einmal lesen und sein Urteil dann noch einmal überdenken. Ich jedenfalls würde mich freuen, mit meinen unerfreulichen Prognosen dann *nicht* Recht behalten zu haben.

Vielleicht ist der einen oder dem anderen die Reflexion, die mit der Beschäftigung mit Wirtschafts- und Sozialgeschichte verbunden ist, auch Anstoß, um den kritisierten Entwicklungen entgegenzuwirken. Dann hätte Archäologie bzw. Geschichte das erreicht, wofür sie eigentlich antritt, nämlich *aus dem Wissen um die Vergangenheit den Blick für die Zukunft zu öffnen*.

Georg Roth, Köln im März 2008

Nachtrag im Frühjahr 2009

Mit unangenehmen Voraussagen behält man nicht gerne Recht. Der selbstvergessene Esel musste nicht nur erkennen, dass die Karotte der neoliberalen Versprechungen ein Trugbild war, sondern auch, dass deren Protagonisten bei genauerem Hinsehen einen ausgesprochen gewissenlosen und zugleich jämmerlichen Haufen bilden. Binnen kürzester Frist hat sich nun die Finanzkrise zur größten Wirtschaftskrise seit 60 Jahren ausgewachsen. Leiden für diese leeren Versprechungen werden aber, und hierfür muss man kein Prophet sein, die Massen der lohnabhängigen Menschen. Todernst wird die Krise schließlich für die Bewohner der seit Generationen übervorteilten so genannten Dritten Welt – was im Norden Existenz erschwerend ist, wird hier Existenz bedrohend werden. Erst wer diese Zeilen in einigen Jahren liest, wird in vollem Umfang ermessen können, *welches* Leid die Herren des Geldes zu verantworten haben.

BAND I - BERGBAU:

Dankes- und Geleitworte als Vorwort.....	III
1. EINFÜHRUNG	1
1.1. EINLEITUNG.....	1
1.2. FRAGESTELLUNG UND ARBEITSAUFBAU	5
1.3. FORSCHUNGSGESCHICHTE	12
1.4. LUFTBILDARCHÄOLOGIE	24
1.5. GEOLOGIE	33
2. UNTERSUCHUNGEN ZUM NEOLITHISCHEN BERGBAU IN ARNHOFEN	44
2.1. SCHACHTVERTEILUNG UND ORGANISATION DES ABBAUS.....	46
2.1.1. Planerstellung	47
2.1.2. Chronologie des Bergwerkes	54
2.1.3. Untersuchungsmethoden der Schachtverteilung	94
2.1.4. Analyse der Schachtverteilung.....	112
2.1.4.1. Art der Schachtverteilung.....	113
2.1.4.2. Punktfeldstatistische Analyse der Schachtverteilung.....	126
2.1.4.3. Analyse der Triangulationslinienlängen.....	167
2.1.5. Modelle für die Schachtgruppierung.....	195
2.1.6. Schachtgruppen in der Kiesgrube	220
2.1.7. Schachtgruppen in der Haldengrabung	239
2.1.8. Abbauorganisation im Vergleich	250
2.2. FUNDVERTEILUNG IN DER HALDE.....	270
2.3. ROHSTOFFVERTEILUNG IM UNTERGRUND UND ABGEBaute MENGEN.....	308 - 333

BAND II - HORNSTEINVERARBEITUNG:

3. VERARBEITUNG UND WEITERGABE DES HORNSTEINS.....	334
3.1. AUSWERTUNGSEINHEITEN	336
3.2. AUSWERTUNG DER FUNDE	348
3.2.1. Rohmaterialverfügbarkeit.....	348
3.2.2. Grundformproduktion	377
3.2.3. Thermische Einwirkungen	419
3.2.4. Anteil natürlicher Flächen.....	432
3.2.5. Grundformmaße	452

3.2.5.1. Grundformgewichte	463
3.2.5.2. Vergleich der Klingenmaße zwischen Mitterfecking und Überau	496
3.2.6. Rohmaterial der Geräte	517 - 544

BAND III - WEITERGABE IM ALTNEOLITHIKUM:

4. UMFANG UND ART DER HORNSTEIN-WEITERGABE	545
4.1. ERFORSCHUNG DER HORNSTEIN-WEITERGABE	545
4.1.1. Forschungsgeschichte.....	545
4.1.2. Methodik	558
4.1.3. Theorie	589
4.2. HORNSTEIN-WEITERGABE WÄHREND DER LINEARBANDKERAMIK	635
4.2.1. Datengrundlage	635
4.2.2. Verbreitung des Rohmaterials	649
4.2.3. Art der Weitergabe	665
4.2.4. Wirtschaftliche Bedeutung in der Linearbandkeramik	680 - 707

BAND IV - WEITERGABE IM MITTELNEOLITHIKUM:

4.3. HORNSTEIN-WEITERGABE WÄHREND DES MITTELNEOLITHIKUMS	708
4.3.1. Datengrundlage	708
4.3.2. Verbreitung des Rohmaterials	723
4.3.3. Art der Weitergabe	757
4.3.3.1. Analyse der Weitergabe	758
4.3.3.1.1. Untersuchung der Weitergabeart.....	758
4.3.3.1.2. Zielgerichteter Handel und mittelneolithische Gesellschaft	773
4.3.3.2. Grenzen der Weitergabe.....	807
4.3.4. Wirtschaftliche Bedeutung im Mittelneolithikum.....	840
4.3.4.1. Die Hochphase im frühen Mittelneolithikum.....	840
4.3.4.2. Überlegungen zum Ende der Hochphase - das späte Mittelneolithikum	884
4.4. Ausblick auf die Hornsteinweitergabe vom Jung- und bis zum Endneolithikum ...	892
5. ZUSAMMENFASSUNG: ZUR PRÄHISTORISCHEN ÖKONOMIE DES ARNHOFENER HORNSTEINS.....	911

6. ANHÄNGE	933
6.1. ANHANG ZU DEN INTERPOLATIONEN	933
6.1.1. Interpolationen zum Bergbau	933
6.1.1.1. Fundverteilung in Feld 1	933
6.1.1.1.1. Artefaktdichte	933
6.1.1.1.2. Durchschnittliches Artefaktgewicht	937
6.1.1.1.3. Anteil verbrannter Artefakte in der Stichprobe	940
6.1.1.2. Verteilung des brauchbaren Rohmaterials (in kg/m ²) in der Kiesgrube	944
6.1.2. Interpolationen zum Arnhofenanteil in neolithischen Inventaren Mitteleuropas.....	948
6.1.2.1. Linearbandkeramik.....	948
6.1.2.2. Mittelneolithikum.....	951
6.2. LITERATURVERZEICHNIS	954 - 987

1. Einführung

1.1. Einleitung

Die *Wirtschaftsgeschichte* der Prähistorie ist für die Entwicklung menschlicher Gesellschaften von grundlegender Bedeutung (vgl. DIAMOND 2006). Archäologische Darstellungen dieses Bereichs erfordern für das Verständnis ihrer Erkenntnisse vom Leser häufig umfangreiches Vorwissen. Das lässt sich natürlich nicht auf den wenigen Seiten einer Einleitung darstellen. Hier wird daher nur in ganz allgemeiner Form der Rahmen dieser Studie vorgestellt.

Mit einer Dauer von mehreren Millionen Jahren ist die *Steinzeit* der längste Abschnitt der Menschheitsgeschichte. Während dieser Zeit gehörten Werkzeuge und Werkzeugteile aus Stein mit zur wichtigsten Ausstattung jeder menschlichen Gemeinschaft. Da diese Gegenstände zugleich aufgrund ihres Rohmaterials zu den dauerhaftesten menschlichen Hinterlassenschaften zählen, sind sie eine besonders wichtige historische Quelle für diesen Zeitabschnitt.

Während der letzten Phase der Steinzeit, der sog. *Jungsteinzeit*, lebten die Menschen als sesshafte Ackerbauern. Ihre Gemeinschaften ähnelten in manchem Bauerngesellschaften, wie sie von der (historischen) Völkerkunde untersucht wurden und werden. Dieser auch als Neolithikum bezeichnete Abschnitt der Steinzeit begann in Mitteleuropa im sechsten Jahrtausend vor Christus.

Mit dem Beginn der *Sesshaftigkeit* war es den Menschen nicht mehr möglich, die Beschaffung der Rohmaterialien für ihre Steinwerkzeuge in einem jahreszeitlichen Wanderzyklus zu integrieren. Zuvor war man durch eine Lebensweise, die auf Sammeln und Jagen ausgerichtet war, gezwungen, mehrmals im Jahr den Lagerplatz zu wechseln. Dabei ließen sich Abstecher an bekannte Rohmaterialquellen leicht in die Wanderungen einbeziehen. Jetzt wählte man seine dauerhaften Wohnorte mit Blick auf landwirtschaftliche Standortfaktoren. Solche Plätze konnten auch in Regionen liegen, die an geeigneten Gesteinen arm waren. Gleichzeitig wuchs die Bevölkerung stärker und die Bevölkerungsdichte erhöhte sich, was zu einem steigenden Bedarf an diesen Materialien führte.

Die *Versorgung* mit Gesteinsrohmaterialien stellte nun eine wirtschaftliche Kernfrage dar. Die Lösungen, welche die Menschen für diese Frage fanden, waren von den natürlichen Voraussetzungen ebenso geprägt wie von den gesellschaftlichen. Dabei lässt sich die natürliche Ausgangssituation archäologisch gut erfassen. Als bedeutendster Aspekt ist an erster Stelle die Entfernung zwischen den Siedlungen und den Rohmaterialquellen zu nennen. Auch konnte die Archäologie aus der Untersuchung von Siedlungen, Gräberfeldern und anderen Quellen einiges über die sozialen Rahmenbedingungen dieser Zeit herausfinden (aber vgl. 4.3.3.1.2.).

Bis heute wurden die meisten *Gesteinsrohmaterialien*, die man für Werkzeuge verwendete, durch archäologische und geologische Untersuchungen identifiziert. Sie lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen, Felsgestein und Silex. Unter Silex werden hier Gesteine und Mineralien verstanden, die vollständig oder überwiegend aus Siliziumdioxid bestehen (vgl. ZIMMERMANN 1995, 5), und deswegen besonders regelhaft brechen. Diese Eigenschaft machte man sich bei der Herstellung von Werkzeugen zunutze. Zum Silex gehören unter anderem der Feuerstein und der aus einem anderen geologischen Zeitraum stammende, aber ansonsten weitgehend gleichartige Hornstein. Von ihnen gibt es viele unterschiedliche Typen, wobei wiederum die meisten dieser Typen von Fachleuten gut mit bloßem Auge unterschieden werden können. Von vielen dieser Silexrohmaterialien sind auch die Herkunftsorte oder -regionen relativ gut bekannt.

Bei der *Silexbeschaffung* richteten sich die jungsteinzeitlichen Menschen nach der Art des Silexvorkommens. Man beutete obertägige Vorkommen ebenso aus wie solche, für die man Untertagebergbau betreiben musste (WEISGERBER 1980). Die Silexversorgung umfasste in der Jungsteinzeit demnach drei Bereiche. Am Anfang stand die Rohmaterialgewinnung. Dann folgte seine Verarbeitung und die Weitergabe an Dritte. Für die Reihenfolge, Kombination und Unterteilung dieser Schritte sind theoretisch viele Organisationsformen denkbar (DE GROOTH 1994, 109ff.), lediglich die Position der unmittelbaren Gewinnung steht natürlich unverrückbar an erster Stelle dieses Wirtschaftsprozesses.

Will man nun die *Wirtschaftsgeschichte der Silexversorgung* untersuchen, bietet es sich an, dafür beispielhaft einen Silex auszuwählen, den man ohne Hilfsmittel gut von anderen unterscheiden kann. Für dieses Beispiel gilt es sodann, die Organisation von Gewinnung, Verarbeitung und Weitergabe archäologisch zu untersuchen. Günstig ist es zudem, wenn der Silex nur an einem Ort vorkommt und deshalb nur von dort beschafft worden sein kann. Wenn außerdem der genaue Ort der Gewinnung bekannt und archäologisch untersuchbar ist, verfügt man über noch mehr (potentielle) Quellen für diese wichtige wirtschaftshistorische Frage der Jungsteinzeit.

Die jungsteinzeitlichen Menschen verarbeiteten je nach Versorgung verschiedenste Silexrohmaterialien. Hat man daher keinen Anhaltspunkt für die ausgesprochene Sonderrolle eines Silexrohmaterials, spricht nichts dagegen, den am Beispielsrohmaterial gewonnenen Erkenntnissen eine gewisse Allgemeingültigkeit für die involvierten jungsteinzeitlichen Gesellschaften zuzugestehen (vgl. ZIMMERMANN 1995). Durch die exemplarische Studie der Wirtschaftsgeschichte eines Silexrohmaterials kann man die Geschichte zweier bedeutender wirtschaftlicher Phänomene verfolgen.

Das eine Phänomen ist die Entwicklung der Arbeitsteilung, also die Art und Weise wie menschliche Gesellschaften die Schaffung ihrer Lebensgrundlage organisierten. Das andere ist die Art der Weitergabe von Gütern, also die Form, in der menschliche Gemeinschaften den Austausch intern und untereinander ausführten.

Der Hornstein von *Abensberg-Arnhofen* erfüllt alle erörterten Ansprüche an ein geeignetes Fallbeispiel. Er tritt in zwei charakteristischen Varianten auf, die auch für das ungeschulte Auge leicht zu erkennen sind. Sein Vorkommen ist auf einen sehr begrenzten Raum in der unmittelbaren Umgebung des kleinen Dorfes Arnhofen, eines Stadtteils von Abensberg im niederbayerischen Landkreis Kelheim, beschränkt. Auch ist einiges über den Ort und sogar die Art des Bergbaus schon bekannt (s. u. 1.3.). Schließlich wird er seit über 30 Jahren bei der Untersuchung von Steinfunden aus jungsteinzeitlichen Siedlungen als eigenständiges Rohmaterial erkannt und dementsprechend gesondert aufgeführt (vgl. DAVIS 1975).

Der *konkrete Anlass* für diese Studie zur Wirtschaftsgeschichte des Arnhofener Hornsteins waren jedoch nicht diese guten Gründe, er ergab sich aus der denkmalpflegerischen Entwicklung in Arnhofen und den jungsteinzeitlichen Fundplätzen in seiner Umgebung (s. u. 1.3. und 3.1.). Die dadurch nötig gewordenen Ausgrabungen versprachen Erkenntnisse, mit denen sich die Fragen nach der jungsteinzeitlichen Silexversorgung im südlichen Mitteleuropa an einem geeigneten Fallbeispiel studieren ließen. Zugleich bot sich die Möglichkeit, dieses Phänomen nicht nur für einen Abschnitt der Jungsteinzeit zu untersuchen, sondern die historische Entwicklung eines wirtschaftlichen Systems über einen längeren Zeitraum zu verfolgen.

Wieweit sich die Hoffnungen darauf erfüllten, können geneigte Leser dieser Studie entnehmen. Sie umfasst die Ergebnisse eines halben Jahrzehnts intensiver methodologischer und quantitativer Forschungen. Die Resultate basieren dabei fast ausschließlich auf der Anwendung quantitativer Methoden. Dies erlaubt es, die Argumente für das historische Bild der Arnhofener Wirtschaftsgeschichte objektiv nachzuvollziehen. Die Nachvollziehbarkeit der argumentativen Grundlagen ist deshalb so wichtig, weil Geschichtsschreibung, und erst recht die Prähistorie natürlich niemals die wahre Vergangenheit beschreiben kann (vgl. GOERTZ 1995). Die Qualität historischer Modelle und Bilder beruht deshalb auf den Argumenten, die zu ihrer Begründung aufgeführt werden. Geschichtsbilder, wie das hier entwickelte zur Wirtschaftsgeschichte der Jungsteinzeit, sind denn auch nur als Annäherung an die Vergangenheit anzusehen, nicht als endgültige Wahrheiten. Die Plausibilität eines solchen Bildes steht und fällt mit der allgemeinen Nachvollziehbarkeit der sie begründenden Argumente – wobei die Quantitäten eine grundlegende Rolle für das Verständnis der Qualitäten spielen.

Die folgenden Abschnitte dieses einleitenden Kapitels sind weiteren einführenden Aspekten gewidmet. Der Abschnitt 1.2. befasst sich mit der Fragestellung. Da das weitere Vorgehen eng mit diesem Punkt zusammenhängt und sich somit die Gliederung der Arbeit nach den Untersuchungszielen richtet, wird dort auch der Aufbau dieser Studie genauer erläutert und begründet. Die weiteren Abschnitte informieren über die Forschungsgeschichte (1.3.), die Ergebnisse der Luftbildarchäologie zur Ausdehnung des Bergwerkes (1.4.) sowie geologische Gesichtspunkte (1.5.).

Während diese Einführung bewusst sehr allgemein gehalten wurde, um auch wirtschaftshistorisch interessierten Nichtarchäologen einen einfachen Zugang zu bieten, wird in den folgenden Teilen dieser Studie bis zur Zusammenfassung ein fachwissenschaftliches Sprachniveau verwendet.

1.2. Fragestellung und Arbeitsaufbau

Das *Thema dieser Arbeit* ist die Archäologie der Gewinnung, Verarbeitung und Weitergabe des Arnhofener Hornsteins. Gegenstand dieser wirtschaftsgeschichtlichen Untersuchung sind damit sowohl das Bergwerk von Arnhofen, als auch Silexinventare von jungsteinzeitlichen Siedlungen aus der näheren und weiteren Umgebung von Arnhofen sowie die Verbreitung dieses Hornsteins in Mitteleuropa.

Um das Thema dieser Arbeit angemessen darzustellen, ist es notwendig, diesen Abschnitt abstrakter zu halten als die Einführung. Dafür muss das allgemeine Niveau der Einführung verlassen werden. In den folgenden Passagen werden daher zunächst die gedanklichen Grundlagen diskutiert. Es geht um die Skizzierung abstrakter Konzepte von dem, was eigentlich konkret zu untersuchen ist. Erst ausgehend davon kann man überlegen, welche archäologischen Fragen genau zu stellen, und wie sie sinnvoll anzuordnen sind. Darauf aufbauend wird im zweiten Teil dieses Abschnitts die Struktur dieser Studie detailliert vorgestellt.

Untersucht man eine Silexversorgung *wirtschaftshistorisch*, stehen drei gleichermaßen ökonomisch und sozial interessante *Phänomene* im Zentrum. Erstens: wie arbeitsteilig waren Gewinnung, Verarbeitung und Weitergabe? Zweitens: auf welche Art und Weise wurden die Erzeugnisse von Gewinnung und Verarbeitung möglicherweise an Dritte übertragen? Die dritte Frage bildet die Grundlage für die Beantwortung der anderen beiden: von welcher Größenordnung war die jeweilige Aktivität der Silexversorgung? Diese drei Fragen ziehen sich als roter Faden durch die gesamte Studie.

Bei allen drei Aspekten ist es von grundlegender Wichtigkeit, die *Organisation* der jeweiligen Tätigkeit zu erforschen. Organisation ist die abstrakte Struktur, die hinter regelgeleitetem menschlichem Handeln steht. Bei vorschriftlichen Gesellschaften gibt es meist keinerlei direkte historische Quellen dafür. Besonders im Fall der Jungsteinzeit kann man sie archäologisch gar nicht direkt erfassen. Von den menschlichen Aktionen verbleiben nur ihre manifesten Resultate, nicht aber die Regeln nach denen man handelte. In den archäologischen Quellen ist das Ergebnis der Regeln also immer nur in indirekter Form zu finden. Man kann auch sagen, archäologisch gesehen ist Organisation der strukturierende Prozess, als dessen Auswirkung Funde und Befunde eine bestimmte räumliche und quantitative (sowie zeitliche) Gliederung aufweisen. Natürlich gilt dies nur für die Quellen, die man aufgrund theoretischer Modelle und archäologischer Vorkenntnisse mit dem Tätigkeitsfeld verbinden kann, dessen Organisation es zu untersuchen gilt.

Bei diesen Quellen wird man ihre Eigenschaften aber nicht für jedes einzelne Quellenobjekt individuell studieren. Denn Organisation wird erst an der Einheitlichkeit, der Ordnung und der Regelmäßigkeit der Untersuchungsobjekte erkennbar. Das sind Begriffe, die Gruppeneigenschaften bezeichnen. Diese lassen sich erst aus der Zusammenschau von größeren Mengen an Untersuchungsobjekten erschließen.

Sucht man nach einem anderen Begriff für Organisation, so kann man auch sagen, Organisation sei die Abwesenheit von Zufall bei den genannten Quelleneigenschaften. Diese Formulierung hat den wichtigen Vorteil, mit bestimmten Methoden objektiv überprüfbar zu sein. Eigenschaften wie Regelmäßigkeit oder Einheitlichkeit erschließen sich erst aus der vergleichenden Betrachtung größerer Datenmengen, wobei deren Elemente aus Gründen der Vergleichbarkeit alle wiederum einheitlich erfasst werden müssen.

Die Merkmale von Organisation besitzen nur selten einen dichotomen Charakter. Meistens handelt es sich um graduell ausgeprägte Eigenschaften, deren Ausprägungen von totaler Abwesenheit bis zur völligen Vorherrschaft reichen. Die jeweils angetroffenen Varianten und der Grad ihrer Ausprägung sind sowohl individuell als auch im Kontext anderer Aspekte zu beurteilen.

Aus diesen einführenden Überlegungen ergeben sich drei weitreichende Folgerungen für die Studie. Die Erste betrifft die Vorgehensweise. Wenn sowohl räumliche als auch quantitative Aspekte zu untersuchen sind, oder wenn gar Verbindungen aus beiden zu analysieren sind, ergibt sich zwangsläufig, dass hier Methoden zur Anwendung kommen müssen, die auf diese Datenformen zugeschnitten sind. Die methodische Grundlage bilden deshalb geostatistische und statistische Verfahren. Wo räumliche Aspekte von besonderem Interesse sind, wurde zusätzlich auf geostochastische Methoden zurückgegriffen. In der Praxis bedeutet dies den Einsatz von Statistiksoftware einerseits sowie von Geographischen Informationssystemen, abgekürzt GIS, andererseits. Die Diskussion der genauen Verfahren und Hilfsmittel gehört nicht an diese Stelle. Sie erfolgt jeweils in den entsprechenden Kapiteln.

Die zweite Folgerung betrifft den Umgang mit den archäologischen Quellen. Für die hier angestrebte Untersuchung wurden von Befunden und Funden solche Merkmale aufgenommen, die sich quantitativ auswerten lassen. Da zudem die Einzelansprache von Objekten für den hier verfolgten Ansatz kaum von Bedeutung ist, wurde auf Fundzeichnungen und Befundkataloge verzichtet. Der dafür nötige Aufwand steht zudem in keiner akzeptablen Relation zum damit verbundenen Erkenntnisgewinn. Auch hätte die Erstellung derartiger Apparate wegen der zahlreichen verschiedenen Quellenarten und den jeweiligen Mengen an Funden und Befunden den Rahmen dieser Arbeit gleich mehrfach gesprengt.

Stattdessen werden die Merkmale der Untersuchungsobjekte je nach Situation quantitativ oder auch räumlich mit Blick auf die Fragestellung ausgewertet. Als Merkmalsträger kommen dabei neben Befunden und Funden auch Siedlungsinventare als Gesamtheit der Funde von einem Platz in Frage. Während bei den Funden die Eigenschaften der jeweiligen Objekte untersucht werden, sind es bei den Befunden und Inventaren je nach Interesse manchmal nur ihre Lageeigenschaften (vgl. u. 2.1.4.), manchmal zusätzlich weitere quantitative Eigenschaften (vgl. u. 4.2.).

Die dritte Folgerung beeinflusst die Formulierung der theoretischen Auswertungsziele bei den jeweiligen archäologischen Quellen. Wie erläutert stellt sich bei jeder Aktivität die Frage nach den Aspekten der Regelmäßigkeit, der Ordnung und der Einheitlichkeit, die sich in den Quellen verbergen. Dabei ähneln sich hier nur die abstrakten Begriffe. Aufgrund der unterschiedlichen Maßstäbe und Skalen ist beispielsweise Regelmäßigkeit bei der Silexartefaktverarbeitung etwas ganz anderes als bei der Schachtverteilung auf dem Bergwerk.

Dementsprechend unterscheidet sich die konkrete Umsetzung der Ziele selbst bei Aspekten, die mit dem gleichen Begriff bezeichnet werden, z. B. wenn es um die räumliche Ordnung von Befunden oder Funden geht. Neben diesen begrifflich gleichen, aber inhaltlich unterschiedlichen Phänomenen ist die Größenordnung der wirtschaftlichen Aktivitäten bzw. die damit verbundene Menge ein zentraler Punkt bei den hier verfolgten Fragen.

Da Qualität als Funktion von *Quantität* (und vice versa) anzusehen ist, kommt gerade der Frage nach der Größenordnung der Aktivitäten eine zentrale Bedeutung bei der Beurteilung der hinter den Quellen stehenden strukturierenden Prozesse zu. Schließlich sind es die Kerneigenschaften der wirtschaftlichen Prozesse wie Kapazitäten, Mengenrelationen oder Verteilungsschlüssel, die Hinweise auf die Art der gesuchten wirtschaftshistorischen Phänomene geben. Die Größenordnungen dieser Aspekte bestimmen zugleich den Umfang der archäologisch erfassbaren Spuren.

Der Grund für die bis hier bewusst vage gehaltene Formulierung der Fragestellungsdetails ergibt sich aus dem Aufbau der Arbeit. Und dieser orientiert sich an der schon mehrmals erwähnten Struktur der Silexversorgung. So beschreiben die drei Bereiche Rohmaterialgewinnung, Verarbeitung und Weitergabe unterschiedliche Ausschnitte menschlicher Aktivitäten. Ihre archäologische Untersuchung wiederum erfordert verschiedene Herangehensweisen. Mit anderen Worten, diese Studie beschäftigt sich mit einem sehr heterogenen Feld. Diese Heterogenität betrifft sowohl den Aufbau des untersuchten Phänomens als auch die Details der jeweiligen Fragestellung, sie macht sich bei den archäologischen Quellen ebenso bemerkbar wie bei den Auswertungsmethoden.

Für die Arbeit wurde daher eine *Gliederung* gewählt, deren Unterteilung sich grob an den drei Hauptaktivitäten der Silexversorgung und den jeweiligen Quellen orientiert: Gewinnung, Verarbeitung und Weitergabe bzw. Bergwerk, Siedlungsinventare und Verbreitung. Dadurch ergeben sich inhaltlich drei Kapitel und eine Zusammenfassung. Das erste Auswertungskapitel, formal das zweite Kapitel, ist der Untersuchung des Silexabbaus gewidmet. Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit der Verarbeitung des Hornsteins. Das vierte Kapitel behandelt die Weitergabe des Silex. Durch ihren Umfang wurde es nötig Kapitel bzw. Teilkapitel als Teilbände zu strukturieren.

Natürlich ist wegen der erwähnten heterogenen Thematik nicht jedes Kapitel ausschließlich mit nur einem Aspekt der Silexversorgung zu verbinden. Auch sind die Quellen und Methoden manchmal ähnlich oder gleich. Schließlich sind die Teilergebnisse der Kapitel eng miteinander verknüpft und fließen auch in andere Kapitel mit ein. So sind beispielsweise bei der Verarbeitung auch wichtige Ergebnisse für die Art der Weitergabe zu gewinnen. Im Kapitel zum Bergbau werden zum Teil die gleichen Funde herangezogen, die auch beim Verarbeitungskapitel ausgewertet werden. Bei der Weitergabe wiederum kommen Methoden zur Anwendung, die schon zur Untersuchung der Bergbauorganisation benutzt wurden.

Aufgrund der Unterschiedlichkeit der einzelnen Aspekte der Silexversorgung ist jedes Kapitel so aufgebaut, dass man es auch als (weitgehend) *unabhängige Teilstudie* lesen kann. Am Anfang stehen jeweils methodische, quellentechnische oder forschungsgeschichtliche Abschnitte. Die Numerierung von Abbildungen und Tabellen erfolgt nach Kapiteln getrennt. Da in einzelnen Abschnitten teilweise sehr unterschiedliche Fragen in schneller Reihenfolge angesprochen werden, sind die entsprechenden Begriffe im Text schlagwortartig kursiv hervorgehoben und untergliedern so den Text zusätzlich.

Die Untergliederung der Kapitel orientiert sich an Aspekten, die eine plausible Aufteilung des jeweils behandelten Phänomens erlauben. Kapitel 2 umfasst drei Teilkapitel, eines zur Befundverteilung (2.1.), eines zur Verteilung von Funden (2.2.) und eines zur Verteilung des Rohmaterials (2.3.). Das Kapitel 3 zur Hornsteinverarbeitung unterteilt sich nach den jeweils ausgewerteten Merkmalskombinationen und beinhaltet insgesamt sechs Teilkapitel (s. u.). Das Kapitel 4, welches sich mit der Weitergabe beschäftigt, besitzt aufgrund der speziellen Thematik ein vorgeschaltetes Teilkapitel (4.1.) zu Forschungsgeschichte, Methodik und Theorie. Die drei weiteren Teile dieses Kapitels sind chronologisch untergliedert und der Untersuchung der bandkeramischen (4.2.), der (früh-)mittelneolithischen (4.3.) und der jung- bis endneolithischen Weitergabe (4.4.) gewidmet. Im abschließenden Kapitel 5 werden die Ergebnisse zur Wirtschaftsgeschichte zusammengefasst.

Aus dieser Gliederung ergibt sich, dass die *konkreten Fragestellungen* sich in den jeweiligen Kapiteln zum Teil deutlich unterscheiden.

Im Kapitel zur Rohmaterialgewinnung (2.) steht die *Organisation des Bergbaus* im Zentrum. Für deren Untersuchung wird zum einen die räumliche Verteilung der Schächte herangezogen (2.1.), mit denen die Bergleute in die Tiefe gruben, bis sie auf das Hornsteinflöz stießen. Als Frage formuliert lautet der Ansatz: Birgt die räumliche Lage der Schächte Hinweise auf die Art und Weise, in der die jungsteinzeitlichen Menschen ihren Bergbau durchführten? Wie sah dieser organisationstechnisch aus und welchen Umfang hatten die Bergbauaktivitäten? Zudem wird in einem eigenen Abschnitt (2.1.2.) ein Modell zur Chronologie des Bergbaus entwickelt.

Durch eine fragestellungsorientierte Ausgrabung standen weitere Quellen für diese Fragen zur Verfügung. In einem zweiten Teilkapitel (2.2.) wurde die Verteilung der Hornsteinverarbeitungsabfälle in den Haldenschichten nahe der Oberfläche untersucht. Auf diese Weise konnte die räumliche Struktur des Bergbaus an zwei auswertungstechnisch voneinander unabhängigen Quellen erforscht werden: Befunden *und* Funden. Bei der Fundverteilung stellen sich ähnliche Fragen wie schon bei den Schächten. Lassen sich hier Hinweise auf die Untergliederung der Bergbauaktivitäten finden? Wie stimmen diese in Art und Größe mit möglichen Erkenntnissen aus der Schachtverteilungsanalyse überein?

Die Größe des möglichen Angebotes an Hornstein, des sogenannten Outputs, ist zur Einschätzung des Bergbaus als Gesamtphänomen von Bedeutung. Der Ermittlung des Outputs widmet sich das letzte Teilkapitel zum Bergbau (2.3.) mit der Frage, wie hängen Bergbau und Flöz zusammen und welche Mengen wurden insgesamt gefördert?

Für das Kapitel (3.), das sich vor allem mit der *Silexverarbeitung*, aber auch der Weitergabe beschäftigt, wurden über 6000 Silexartefakte von Fundplätzen mit verschiedener Zeitstellung und unterschiedlichem geographischen Bezug zum Bergwerk merkmalsanalytisch ausgewertet (3.1.). Bei den Analyseschritten (3.2.) stand als grundsätzliche Fragestellung im Vordergrund, wie hoch war der Spezialisierungsgrad der Menschen, die mit der Verarbeitung und der Weitergabe (sowie dem Bergbau) beschäftigt waren? Was wurde weitergegeben und in welchen Mengen? Welche wirtschaftliche Organisationsform stand hinter diesen Aktivitäten?

Die erste Detailfrage zielt unter Heranziehung der Rohmaterialgewichtverteilungen auf die Verfügbarkeit der verschiedenen Silextypen (3.2.1.). Danach wird versucht, mit den Grundformhäufigkeiten der Silextypen zu klären, was weitergegeben wurde und wo die Verarbeitung stattfand (3.2.2.). Der Anteil der verbrannten Stücke liefert zudem möglicherweise Hinweise auf den Umgang mit und die Wertschätzung von Silex und spiegelt damit ebenfalls indirekt die Versorgung wider (3.2.3.).

Die Häufigkeit von Silexartefakten mit Resten der natürlichen Rohmaterialoberfläche (“Rinde“) und der Grad, in dem diese Stücke damit bedeckt sind (3.2.4.), erlauben es, den Abarbeitungsgrad der Hornsteinkerne zu erkennen.

Da Steinartefakte grundsätzlich nur durch das Zerlegen und damit der Verkleinerung von Ausgangsstücken entstehen können, sind unterschiedliche Maße besonders bedeutsam (3.2.5.). Die allgemeinen Fragen des dritten Kapitels wurden deshalb sowohl an die Gewichtsverteilungen der Grundformklassen gestellt (3.2.5.1.), als auch an alle Maße zweier Klingenserien aus dem wichtigsten Zeitabschnitt der Nutzung des Arnhoferer Hornsteins (3.2.5.2.). Schließlich wurden für die hier verfolgten Ziele auch noch die Häufigkeiten der Silexgeräte aus unterschiedlichen Rohmaterialien ausgewertet (3.2.6.). So soll herausgefunden werden, ob es bei den wirtschaftlichen Aktivitäten Unterschiede zwischen den Siedlungen gab. Die Fragestellungen bei den einzelnen Merkmalskombinationen stehen dabei alle in enger Verbindung miteinander und wiederholen sich teilweise. Daher galt es jedesmal noch zu überprüfen, ob sich die einzelnen Ergebnisse widersprechen oder stützen.

Mit dem Kapitel zur *Weitergabe* (4.) werden zwei schon bekannte Fragen in den Mittelpunkt gerückt. Welche Art der Weitergabe bzw. des Tausches wurde wann beim Arnhoferer Hornstein verfolgt und welchen Umfang hatten die Aktivitäten? Hier geht es wieder um den Grad der Spezialisierung und damit der gesellschaftlichen Arbeitsteilung.

Das Kapitel 4. wird nochmals extra mit einem theoretischen Teil eingeleitet (4.1.). Da die Verbreitung eines Rohmaterials relativ selten quantitativ untersucht wird und sich die Forschung hier in den letzten Jahrzehnten rasch weiterentwickelte, ist zunächst zu klären, wie diese Entwicklung aussieht, welche Methoden demnach angebracht sind und mit welcher Begrifflichkeit und welchen theoretischen Modellen zu operieren ist?

Aufbau und Fragestellung gleichen sich bei den beiden Teilkapiteln 4.2. und 4.3. weitgehend. Um welche Art der Weitergabe handelte es sich in den einzelnen Phasen und welchen Umfang hatte sie? Dafür wird zunächst untersucht, welche Problematik mit der jeweiligen Quellenbasis verbunden ist (4.2.1. und 4.3.1.). Anhand der quantitativen Kartierungen ist zu diskutieren, wieviel die Verbreitung bereits über die Art der Weitergabe verrät (4.2.2. und 4.3.2.). Um diese Frage eindeutig zu klären, wird je eine Kartenanalyse vorgenommen (4.2.3. und 4.3.3.1.1.). Abschließend ist jeweils noch festzustellen, welche Quantitäten bei der Weitergabe bewegt wurden (4.2.4. und 4.3.4.). Für den bedeutsamsten Nutzungsabschnitt im 5. Jt. v. Chr. stellt sich zusätzlich die Frage, ob die Erkenntnisse zur Weitergabe mit dem Wissen über die Sozialgeschichte zu vereinbaren sind (4.3.3.1.2.). Dabei ist auch zu überprüfen, ob die angenommene Art der Weitergabe für bäuerlich lebende Gemeinschaften praktisch möglich war (4.3.3.2.).

In einem kleinen gesonderten Abschnitt (4.3.4.2.) gilt es schließlich zu erwägen, warum die mittelneolithische Hauptnutzungsphase endete. In dem als Ausblick angeschlossenen Teilkapitel (4.4.) wird zuletzt der Frage nachgegangen, wie es in den jüngeren Phasen des Neolithikums mit der Nutzung des Arnhoferer Hornsteins weiterging.

Diese Studie steht mit ihrer Fragestellung in einer langen Forschungstradition. Solche und ähnliche Fragen wurden in der prähistorischen Forschung zur Jungsteinzeit schon seit langem intensiv diskutiert (vgl. z. B. LECH/LELIGDOWICZ 1998; vgl. u. 4.1.1.). Hier ist nicht der Platz diese Debatte zu wiederholen. Da Arnhofen einer der bedeutendsten derartigen Plätze im westlichen Mitteleuropa ist, kann nicht überraschen, dass dieses Bergwerk in der deutschsprachigen Debatte zur Wirtschaftsgeschichte der jungsteinzeitlichen Silexversorgung eine wichtige Rolle spielt. Wie es dazu kam, zeigt der folgende Abschnitt zur Geschichte der Erforschung Arnhofens.

1.3. Forschungsgeschichte

Bereits in den frühen 1970er Jahren vermutete Frank Davis in der *Umgebung von Kelheim* einen jungsteinzeitlichen Bergbau auf den gebänderten Plattenhornstein, der ihm aus vielen Siedlungsinventaren bekannt war (ders. 1975, 22f.). Da ihm jedoch von Seiten der Geologie eine nicht ganz korrekte Schichtenansprache und somit nur eine fehlerhafte Karte zur Verfügung standen (vgl. a. a. O., 20f. und Abb. 5), nahm er an, die Gewinnungsstelle hätte im Kelheimer Ortsteil Kelheimwinzer gelegen. Ungefähr zur gleichen Zeit erfolgte der Neubau der Bundesstraße 16 zwischen Kelheim und Abensberg – wie sich später herausstellte mitten durch das Bergwerk von Arnhofen hindurch. Für diese Baumaßnahme wurde östlich der neuen Bundesstraße auf der Plannummer 539 eine Kiesgrube angelegt (MOSER 1978, 55f.; zur Lage s. u. 1.4. Abb. 1.5). Aus Manfred Mosers Publikation wird nicht ganz klar (a. a. O., 48 und 55), ob es dieser Aufschluss war, der ihm die Entdeckung des als “Abbaugelände“ bezeichneten Bergwerkes von Arnhofen ermöglichte. Nach seinen Angaben entdeckte er es 1972, was zeitnah oder gleichzeitig zum Straßenbau gewesen sein muss. Auf der Fläche dieser Kies- und Sandgrube stehen heute zahlreiche Gebäude der Baumschule Lehmann. Schon Moser erkannte, dass es sich bei Arnhofen um eine bedeutende Fundstelle handelte und wies ausdrücklich daraufhin (ebd.).

Bernd Engelhardt beobachtete seit 1980 auf den Hinweis von Moser hin die Fortführung des *Kiesabbaues* im südlich der Sandgrube gelegenen Grundstück (**Abb. 1.1**; Plan-Nr. 509). Im Sommer des darauffolgenden Jahres wurde die Bodendenkmalpflege mit einer Notgrabung tätig (ENGELHARDT 1983, 70). Am Ostrand des als Kiesgrube “Buchenrieder“ (später Deponie “Buchenrieder“) bezeichneten Aufschlusses wurde ein Schacht teilweise ausgegraben. Als der Kiesabbau ab 1984 zahlreiche Schächte anschnitt, wurde von der Bodendenkmalpflege sofort eine Grabung begonnen, die 1986 endete (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 3; vgl. BINSTEINER 1990 Beil. 2). Der mit der Grabung vor Ort betraute Geologe Alexander Binsteiner führte noch bis zur Verfüllung der Kiesgrube 1989 weitere Beobachtungen des Abbaus fort. Die Ergebnisse dieser Grabung wurden nie abschließend vorgelegt. Neben kleineren Artikeln existieren nur zwei größere Vorberichte (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, BINSTEINER 1990). Bei meinen Nachforschungen zum Verbleib der Originaldokumentation im Jahr 2001 war diese 11 Jahre nach ihrer letzten nachweisbaren Verwendung für die Publikation von 1990 nicht mehr auffindbar. Der Vorlage der neueren Grabungsergebnisse kommt daher besondere Bedeutung zu.

Die *Ergebnisse der Altgrabung* und der Beobachtungen aus den Jahren 1981 bis 1989 bestanden im Nachweis, dass die Gewinnung des von Davis herausgestellten Silex in Form von systematischem Bergbau erfolgte.



Abb. 1.1: Abensberg-Arnshofen. Luftbild der Ausgrabung im Juni 2001 mit Blickrichtung West. In der Bildmitte links ist die Kiesgrube auf der Parzelle "Brandl" (Plan-Nr. 525) mit den Grabungsschnitten und ihrer Sohle aus weißem Sand zu sehen. Unmittelbar rechts bzw. nördlich von der Grubensohle liegt die großflächige, befundorientierte Ausgrabung der Haldenschichten. Sie zeichnet sich an drei Seiten als gelbes Quadrat von den umgebenden, braun gefärbten Rodungsflächen ab. Auch diese gerodeten Flächen, die sich nach rechts bzw. Nord bis zu dem von West nach Ost verlaufenden Feldweg erstrecken, sind heute (12/2007) weitgehend dem Kiesabbau zum Opfer gefallen. Auf dem im Jahr 2001 nach Süden reichenden Vorsprung der gerodeten Flächen entstand direkt unterhalb (östlich) der großen Haldengrabung im Juli 2001 das sogenannte Feld 1. In der oberen linken Ecke (Südwestecke) der Kiesgrube schmiegt sich eine moderne Halde an die Böschungen (vgl. u. Abb. 1.2). Von der rechten unteren Ecke der Kiesgrube (Nordost-ecke) verläuft eine Zufahrt entlang der Grundstücksgrenze von Süd nach Nord. Sie verbindet den Grabungsbauwagen (grüner Container) mit dem Feldweg. Diese Zufahrt trennt die Kiesgrube "Brandl" von der nach 1989 mit Bauschutt verfüllten Grube "Buchenrieder" (Plan-Nr. 509) im Bildvordergrund. Die Ausgrabungen der 1980er Jahre lagen mehrere Meter unter der heutigen Oberfläche der Parzelle Nr. 509, die mit Wirtschaftswegen und Büschen überzogen ist. Rechts bzw. nördlich des Feldweges sind an den Gewächshäusern und den Streifenbeeten Flächen der Baumschule Lehmann zu erkennen. In der rechten unteren Ecke ragt gerade noch die später verfüllte Sandgrube (Plan-Nr. 539) ins Bild, in der Moser 1972 den Bergbau entdeckte. Die weiße Punktlinie bezeichnet den Verlauf der Südgrenze des Bergwerks, der durch Ausgrabungen belegt ist (vgl. u. 2.1. Abb. 2.1). Alle im Bild befindlichen Flächen rechts dieser Linie gehören zum jungsteinzeitlichen Bergwerk und vermutlich auch der Großteil des Waldes am oberen Bildrand. Auf der Abbildung 1.5. ist die gesamte Situation nochmals im Plan wiedergegeben (Foto: Klaus Leidorf 23.06.2001, Luftbildnr. 141-4173).

Die jungsteinzeitlichen Menschen gruben kreisrunde, bis 2 m durchmessende und bis über 8 m tiefe *Schächte* senkrecht nach unten. Bei Erreichen des Flözes erweiterten die steinzeitlichen Bergleute die Schächte einige Dezimeter bis etwas über einen Meter zu den Seiten hin, um den Hornstein hereinzugewinnen. Diese Abbauform wird als Duckelbau bezeichnet und ist dem Untertagebergbau zuzurechnen (FOBER/WEISGERBER 1980). Arnhofen war zwar nicht der erste Nachweis derartiger Abbauformen für das Neolithikum im südwestlichen Mitteleuropa (vgl. REISCH 1974), die Anzahl der Schächte und die zu vermutende Größe des Bergwerks stellten jedoch für die mitteleuropäische Erforschung der Jungsteinzeit eine Sensation dar.

Die Untersuchungen der 1980er Jahre galten in erster Linie den Details der Bergbautechnik – ihre Ergebnisse sind im Prinzip heute noch gültig. Alle in Arnhofen bis 2007 (Stand 9/2007) vorgefundenen, eindeutig ansprechbaren Bergbauspuren entsprechen dem Typ Duckelbau. Auch dass die Schächte nach ihrer Aufgabe regelhaft vom Menschen verfüllt wurden (BINSTEINER 1990, 28), bestätigte sich bei den neueren Ausgrabungen. Eine Auswertung der räumlichen Schachtverteilung wie bei anderen Bergwerksausgrabungen dieser Zeit fand aber nicht statt (vgl. BORKOWSKI et al. 1989; vgl. 2.1.8.). Für die Datierung der ausgegrabenen Bergbauspuren wurde nur eine einzige Radiokohlenstoffprobe aus einer Haldenschicht ausgewertet (s. u. 2.1.2. Tab. 2.1). Das verbrannte Holz stammt aus der Zeit um 4200 v. Chr.

Bei den Ausgrabungen durch Engelhardt und Binstener wurde auch festgestellt, dass knapp unter der modernen Oberfläche noch ungestörte jungsteinzeitliche *Haldenschichten* von bis zu einem halben Meter Mächtigkeit vorhanden waren (dies. 1988, 11 Abb. 8). Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die gezielte Untersuchung der Haldenschichten mit neuen Methoden in der hier ausgewerteten Grabung (s. u. 2.2.). Aus diesen Schichten wurden schon bei der Altgrabung enorme Mengen an Hornsteinartefakten geborgen (BINSTEINER 1990, 33ff.). Aber bereits die grobe statistische Auswertung ließ mehr Fragen offen, als sie beantwortete. Da die Artefakte nicht nach der (schon damals) gängigen archäologischen Terminologie unterteilt wurden (vgl. LANGWEILER 1977; ZIMMERMANN 1988), fehlte den Ergebnissen die Vergleichbarkeit mit Siedlungsinventaren. Es konnten also entscheidende wirtschaftshistorische Aspekte nicht geklärt werden. Auch eine Auswertung der Fundverteilung in der Halde unterblieb, wenn man einmal von der Unterteilung nach Abhüben und einer damit grob nachvollziehbaren vertikalen Gliederung absieht.

Neben den konkreten Beobachtungen wurden zudem Überlegungen zur *Wirtschaftsgeschichte* angestellt, etwa zum Umfang des Bergbaus. Auf der Basis einer Rohstoffsondage, von der es keine genaueren Angaben zur Lage gibt, gelangte Binstener schließlich zu einer Outputschätzung zwischen 91 t und 202 t Hornstein (ders. 1990, 14). Später revidierte er diesen Wert auf derselben Zahlengrundlage ohne Angabe von Gründen auf 219 t (ders. 2005, 63).

Diese Werte hätten schon angesichts der damals bekannten Verbreitung dieser Hornsteinvariante verwundern müssen – allerdings stand man damals noch am Anfang einer quantitativen Wirtschaftsarchäologie der Silexversorgung. Die von Binsteiner für einen Schacht veranschlagte Arbeitszeit basiert dagegen auf einem geologischen Verständnisfehler (ders. 1990, 31). Er orientierte sich an Vergleichszahlen aus einem neolithischen Bergwerk (Rijckholt/NL; vgl. FELDER et al. 1998), bei dem der Vortrieb teilweise durch massiven Kreidefelsen erfolgte. In Arnhofen dagegen grub man in der Regel nur durch lockeres Material (Sand und Kies; vgl. u. 1.4.).

Die *Verbreitung* des Arnhofener Hornsteins wurde ebenfalls untersucht. Dabei stand jedoch der Plattenhornstein im Vordergrund (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 23ff.). Bis heute wurden nur kursorische Punkt- oder Flächenkartierungen vorgelegt. Keine dieser Kartierungen erlaubt eine wissenschaftliche Überprüfung oder gar weitere Verwertung der Fundpunkte, da die zugehörigen Fundstellenlisten und Literaturzitate fehlen (vgl. BINSTEINER 2005, 132f. Abb. 4 z. B. mit ZIMMERMANN 1995, 38f. Abb. 9 und 133ff.). Obwohl zu vielen der so kartierten Plätze quantitative Informationen wie beispielsweise der Anteil des Arnhofener Hornsteins und sein Grundformspektrum vorliegen (ebd.), wurden sie bei den Karten nicht berücksichtigt. Selbst die aktuellste Kartierung verwirrt mit ihren Zahleninformationen mehr als dass sie hilft, denn es werden absolute Anzahlen kartiert (vgl. BINSTEINER 2005, 132f. Abb. 4 und Abb. 5), ohne die Inventargrößen mitzuteilen. Für eine wirtschaftsarchäologische Fragestellung sind solche Abbildungen nur sehr bedingt brauchbar.

Während sich also fast alle konkreten Ergebnisse der Ausgrabungen und Beobachtungen zum Schachtbau als allgemeingültig für Arnhofen und damit als wertvoll für mögliche weitere gezielte Forschungen herausstellten, ließen die wirtschaftshistorischen Resultate zu den abstrakteren historischen Phänomenen viele Fragen offen.

Zugleich entspann sich ein *wissenschaftlicher Disput* über die wirtschafts- und sozialgeschichtlichen Grundlagen des jungsteinzeitlichen Bergbaus in Arnhofen. Nur wenige Kilometer von Arnhofen entfernt hatte die niederländische Universität Leiden in den 1960er und 70er Jahren umfangreiche Grabungen in der alt- und mittelneolithischen Siedlung Hienheim unternommen (MODDERMAN 1977; vgl. u. 3.1. Abb. 3.1). Die Auswertung der dort gefundenen Silexartefakte zeigte nach Ansicht der Bearbeiterin Marjorie De Grooth (dies. 1994), dass der Bergbau in Arnhofen eine eher unbedeutende Nebentätigkeit im Wirtschaften der bäuerlichen, jungsteinzeitlichen Gesellschaft darstellte. Sie sah in keinem der Bereiche der Silexversorgung (Gewinnung, Verarbeitung und Weitergabe) irgendeine Form weitergehender arbeitsteiliger Spezialisierung und nahm für die Weitergabe einen Tausch von Hand zu Hand an (zur Terminologie vgl. u. 4.1.3.).

Dabei griff sie zum erstenmal in einer deutschsprachigen Arbeit zu Fragen der Silexversorgung intensiv auf archäologisch-theoretische und ethnologische Studien zurück. So konnte sie ihre Ergebnisse auf eine bis ins Detail nachvollziehbare Argumentation gründen.

Eine weitgehend entgegengesetzte Ansicht vertraten dagegen die Ausgräber von Arnhofen (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988; BINSTEINER 1990). Man sah die Bergleute als "Saisonnarbeiter" oder "Nebenerwerbslandwirte" an (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 27), ohne dabei auf die damit implizit behauptete Lohnarbeit in der Jungsteinzeit einzugehen. Man vermutete, Bergbau und Weitergabe seien in einem wesentlich höheren Grad arbeitsteilig organisiert gewesen. Dieses Modell bedeutet in seiner Konsequenz, die Wirtschaftsweise der beteiligten Gemeinschaften hätte sich so stark von der anderer Siedlungen unterscheiden müssen, dass man es archäologisch eindeutig nachweisen können müsste. Diese Ansicht stand forschungsgeschichtlich in einer Tradition, die besonders die enormen Fundmengen von Rohmaterialgewinnungsstellen als Beleg für vollzeitspezialisierte Bergleute, Handwerker und Händlern sah (und sieht). Im Gegensatz zu de Grooth wurde dabei die argumentative Grundlage nicht explizit erläutert. Aus den Vorberichten wurde nicht ganz klar, welche Eigenschaft welcher archäologischen Quelle aus welchem Grund als Anzeichen für welche Interpretation angesehen wurde, oder ob es sich um ad hoc Assoziationen ohne theoretischen Hintergrund handelte. Zu Beginn der 1990er Jahre befand sich die theoretische Debatte in der deutschsprachigen Archäologie allerdings noch in ihren Kinderschuhen (vgl. HÄRKE 1995, 56f.) – ein komplexes Thema wie die Silexversorgung ohne eine theoretische Diskussion aufzuarbeiten, war dementsprechend problematisch.

Seit 1990 vertritt praktisch nur noch der Geologe Alexander Binsteiner die oben vorgestellte *Extremposition* zur wirtschaftsgeschichtlichen Archäologie Arnhofens (BINSTEINER/NEUMANN-EISELE 2001). Dabei nimmt er im Fall der Verarbeitung und der Weitergabe schließlich sogar Vollzeitspezialisten an. Begriffe wie "wandernde Handwerker", "Massenproduktion" und 'Kinderarbeit' illustrieren ungewollt (ebd.; BINSTEINER 2005, 66), dass sein Modell eigentlich eine Lebenswelt der frühen Neuzeit bzw. der frühen Industrialisierung nachzeichnet (vgl. u. 4.3.3.1.2.). Bei den im Umfang abgewandelten aber inhaltlich stets gleichlautenden Wiederholungen dieser Position (vgl. BINSTEINER/ERNSTSON 2001) werden weder ihre Kritiker und noch deren Argumente erwähnt (vgl. ders. 2005, 47f.). Auch die umfangreiche Literatur, die in der Völkerkunde und der Archäologie in den letzten vier Jahrzehnten zur Wirtschaftsgeschichte entstand, wird nur der Datenlage, nicht aber dem Inhalt nach berücksichtigt, obwohl sie sich teilweise speziell mit der Silexversorgung beschäftigt (ebd.; vgl. u. 4.1.1. und 4.1.3.).

1995 gelangte dagegen Andreas Zimmermann in einer detaillierten Studie zur *bandkeramischen Weitergabe* von Rijckholt-Feuerstein zu einem ähnlichen Geschichtsbild, wie es De Grooth zuvor beim Arnhoferer Hornstein angenommen hatte (vgl. dies. 1994). Damit standen zu einer zentralen wirtschaftshistorischen Frage der Jungsteinzeit zwei entgegengesetzte Positionen im Raum. Die eine (Binsteiner) fußte dabei überwiegend auf der Untersuchung eines Bergwerks, die andere (De Grooth und Zimmermann) auf der Auswertung von Siedlungsfunden.

Das Bergwerk von Arnhofen wurde damit zu einem zentralen Diskussionsobjekt der deutschsprachigen Forschung. Ab 1989 ruhten aber dort die Untersuchungen – die Grabungsergebnisse der 1980er Jahre sind übrigens bis heute (Stand März 2008) nicht abschließend vorgelegt.

Währenddessen stieß man auf einige mit dem Bergbau verbundene *Siedlungen*. Die fortschreitende Zersiedlung der Umgebung des Ballungsraumes Regensburg führte zu immer neuen Ausweisungen von Neubaugebieten am Rand vieler verkehrstechnisch besser erschlossener Ortschaften im Kreis Kelheim. Die Lage der Ortskerne dieser früher agrarisch geprägten Dörfer geht auf die gleichen siedlungsgeographischen Standortfaktoren zurück, die im Prinzip schon die jungsteinzeitliche Besiedlung der Mittelgebirgslandschaft des nordwestlichen Niederbayern beeinflusst hatten: günstig exponierte flache Unterhanglagen und Terrassenkanten in der Nähe von Gewässern und guten Ackerböden (KÜSTER 1999, 81 und 176). Aufgrund der gleichen Standortpräferenzen führten und führen moderne Ortserweiterungen deshalb häufig zur Zerstörung archäologischer Fundplätze. Als letztes Mittel bleibt der Bodendenkmalpflege nur die Ausgrabung, weil die Unterschutzstellung von archäologischen Bodendenkmälern gegen wirtschaftliche Interessen so gut wie nie durchsetzbar ist.

So grub die Kreisarchäologie Kelheim 1993 im Vorfeld eines Neubaugebiets am Ostrand der Marktgemeinde Bad Abbach Teile einer alt- und mittelneolithischen Siedlung aus – nur 17 km vom Bergwerk Arnhofen entfernt (RIND 1993; ders. 1994a; vgl. u. 3.1. und Abb. 3.1). Bereits im folgenden Jahr war wiederum eine gleichartige Fundstelle am damaligen Südrand des Dorfes Mitterfecking, eines Ortsteils der Verbandsgemeinde Saal an der Donau, auszugraben (POWROZNIK/RIND 1997; RIND 1994b; vgl. u. 3.1. Abb. 3.1). Diese Siedlung war nur 6 km Luftlinie vom Bergwerk entfernt. Beide Siedlungen bestanden, wie man durch die Hienheimer Ausgrabungen wusste, zeitgleich zum Bergbau in Arnhofen und beide lagen wie das Bergwerk auf der südlichen Donauseite. Die Hienheimer Siedlung dagegen befand sich auf dem nördlichen Donauufer. Zudem war aus jahrzehntelangen Beobachtungen bekannt, dass zumindest Mitterfecking eng mit dem Bergbau in Arnhofen verbunden sein musste (BINSTEINER/PLEYER 1988).

Dementsprechend lieferten Mitterfecking und Bad Abbach auch zahlreiche Silexfunde, von denen viele aus Arnhofener Hornstein bestanden (s. u. 3.1. und 3.2.1.). Für die Klärung der weiterhin offenen Debatte standen nun neue archäologische Quellen zur Verfügung.

In dieser Situation wurde für *Arnhofen* 1995 der Kiesabbau auf einem Waldgrundstück genehmigt, das unmittelbar westlich an die bisherige Ausgrabung grenzt. Trotz der Bedeutung des Bodendenkmals konnte keine Aufhebung der Abbaugenehmigung erwirkt werden.

Die Kreisarchäologie Kelheim begleitete den neuerlichen Kiesabbau in Arnhofen ab seinem Beginn im Sommer 1998 mit Ausgrabungen, denn, wie zu erwarten, wurden sofort Teile des Arnhofener Bergwerks erfasst. Es war jedoch schnell klar, dass die Mittel der Kreisarchäologie für den zu erwartenden Umfang der Ausgrabungen zunächst nicht ausreichen würden (EISELE/RIND 2001, 23f.). In den Jahren 1999 und 2000 wurde daher von der Kreisarchäologie Kelheim und dem Kölner Institut für Ur- und Frühgeschichte ein gemeinsames Forschungsprojekt unter der Federführung von Prof. Dr. Andreas Zimmermann vorbereitet.

Vor Ort grub indessen die *Kreisarchäologie* 1998 aus eigenen Mitteln aus und konnte trotz der problematischen Situation immerhin 21 Schächte an der Abbauwand der neuen Kiesgrube in Arnhofen dokumentieren (RIND 2000b, 44). Auf den Flächen die für den Kiesabbau schon gerodet und vom Humus befreit worden waren, wurde zudem im März 1999 eine Magnetometerprospektion durchgeführt (a. a. O., 48 und 43 Abb. 3).

Im März 2000 war in nur wenigen Tagen Notgrabung die gesamte Sohle der mittlerweile entstandenen Kiesgrube mit einem Planum zu dokumentieren. Dieses Planum, dessen Niveau ungefähr 3 m unter der ehemaligen Oberfläche lag, erhielt später die Nummer drei.

Nach längerer Prüfung wurde schließlich im September 2000 das *Forschungsprojekt* bewilligt, so dass die Ausgrabungen im Oktober beginnen konnten. Von da an bis Ende 2003 war ich in verschiedenen Positionen als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsprojekt tätig. Die Ausgrabungen vor Ort leitete der Grabungstechniker Klaus Eisele unter der wissenschaftlichen Leitung des Kreisarchäologen PD Dr. Michael-Maria Rind.

Die Ausgrabungen des Projektes dauerten von Oktober bis Anfang Dezember 2000 und wurden schon im März 2001 wieder aufgenommen, um bis zum Spätherbst fortgeführt zu werden. Die Ausgrabungen des Projektes setzten sich aus einer Vielzahl verschiedener Aktivitäten zusammen. Zunächst wurde noch im Herbst 2000 die Sohle der Kiesgrube in etwa 4m Tiefe als sogenanntes Planum 4 dokumentiert (**Abb. 1.2**).

Im Frühling 2001 wurden auf der Sohle der *Kiesgrube* weitere Plana angelegt und die Sohlen einiger Schächte untersucht. Die Fläche der Kiesgrube betrug nun ca. 2000 m².

Gegen Ende des Winters 2001 hatte der Eigentümer noch die gesamte Nordhälfte des Grundstücks, also den noch ebenerdigen Bereich, gerodet. Auf diesen freien Flächen wurde direkt nördlich der Kiesgrube im Juni 2001 ein großer quadratischer Ausgrabungsschnitt geöffnet, um die Schachtverteilung im Planum in den *Haldenschichten* zu untersuchen.

Östlich von dieser Fläche und nördlich von der Kiesgrube entstand dann im Juli 2001 das sogenannte Feld 1. Hier wurde die Verteilung der Funde in den Haldenschichten gezielt untersucht.

Beide Flächen, die der größeren Haldengrabung und die von Feld 1, lagen zunächst vom Niveau her nur einige Dezimeter unter dem ehemaligen Waldboden. Entlang der Böschung zwischen diesen nördlicheren Flächen und der mittlerweile über 4 m tiefen Kiesgrubensohle im Süden konnten im Laufe des Sommers mehrere Schächte im Profil untersucht werden (vgl. EISELE et al. 2003, Abb. 19; vgl. u. 2.1.1. Abb. 2.2).



Abb. 1.2: Abensberg-Arnhofen. Blick von Nord nach Süd auf die Arbeitssituation beim Planum 4 in der Kiesgrube „Brandl“ im November 2000.

Das Foto zeigt den Blick vom späteren Bereich der Haldengrabung nach Süden in den tiefer gelegenen Grabungsteil „Kiesgrube“. Fast alle kreisrunden Verfärbungen auf dieser Fläche, ob braun oder weiß, sind ehemalige Schächte des jungsteinzeitlichen Bergbaus. Im Hintergrund ist die Südböschung der Kiesgrube zu sehen, rechts ihre Westböschung. Beide Böschungsoberkanten verlaufen entlang der jeweiligen Grundstücksgrenze. Die Personen und das Grabungszelt stehen schon jenseits der Südgrenze des Bergwerks. Hinter ihnen liegt in der Südwestecke der Kiesgrube die Vorratshalde des modernen Kiesabbaues.

Die komplizierte räumliche Situation wird auch in der Bildunterschrift von Abbildung 1.1. ausführlich erläutert (vgl. u. 1.4. Abb. 1.5. und 2. Abb. 2.1.). Im Spätsommer und Herbst 2001 wurden dann noch im großen Haldenschnitt mehrere Plana erfasst. Deren Wände bildeten senkrechte Querschnitte durch die Haldenschichten (**Abb. 1.3**).



Abb. 1.3: Abensberg-Arnhofen. Blick im September 2001 von West nach Ost über die Schnitte durch die Halde im nördlichen Grabungsbereich. Der Grabungsschnitt hinter dem Tachymeter rechts des Zeltes ist das Feld 1. Rechts oberhalb von Feld 1 ist gerade noch das Dach des Grabungsbauwagens zu erkennen. Im Hintergrund entlang des oberen Bildrandes geht der Blick auf die mit Büschen bestandene Parzelle "Buchenrieder", auf deren Fläche die Grabungen der 1980er Jahre lagen (vgl. o. Abb. 1.1).

Von diesen Wänden und der Böschung der Zufahrt wurden daher die Profile aufgenommen. Durch die gezielte Untersuchung zweier weiterer Schachtmünder östlich von Feld 1 gelang der Nachweis, dass Feuerstellenreste in die Schächte verfüllt wurden (vgl. u. 2.2.).

Die *spektakulärste Beobachtung* auf der Grabung stellten zahlreiche Phänomene dar, die durch eine von Klaus Eisele eingeführte, besonders feine Grabungstechnik möglich wurden. Ihm und seinen Mitarbeiter/-innen gelang es, die Verfüllungen von Schächten negativ auszugraben, obwohl das Anstehende und damit die Schachtwände ebenso wie die Verfüllung aus Sand bestanden.

Durch die vorsichtige Entfernung der Verfüllung wurden die über 6000 Jahre alten Schachtwände (vgl. u. 2.1.2.) wieder freigelegt. Die Schachthälse stellten senkrechte Röhren mit glatten und zumeist regelmäßig gerundeten Außenwänden dar. Manchmal jedoch ließen sich Abdrücke unbekannter Objekte erkennen (vgl. RIND 2004, 60 und Taf. 1,3). In einem Fall dürfte es sich mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit um die Abdrücke eines spatenförmigen Gerätes mit einer Blattbreite von etwa 20 cm handeln (**Abb. 1.4**).

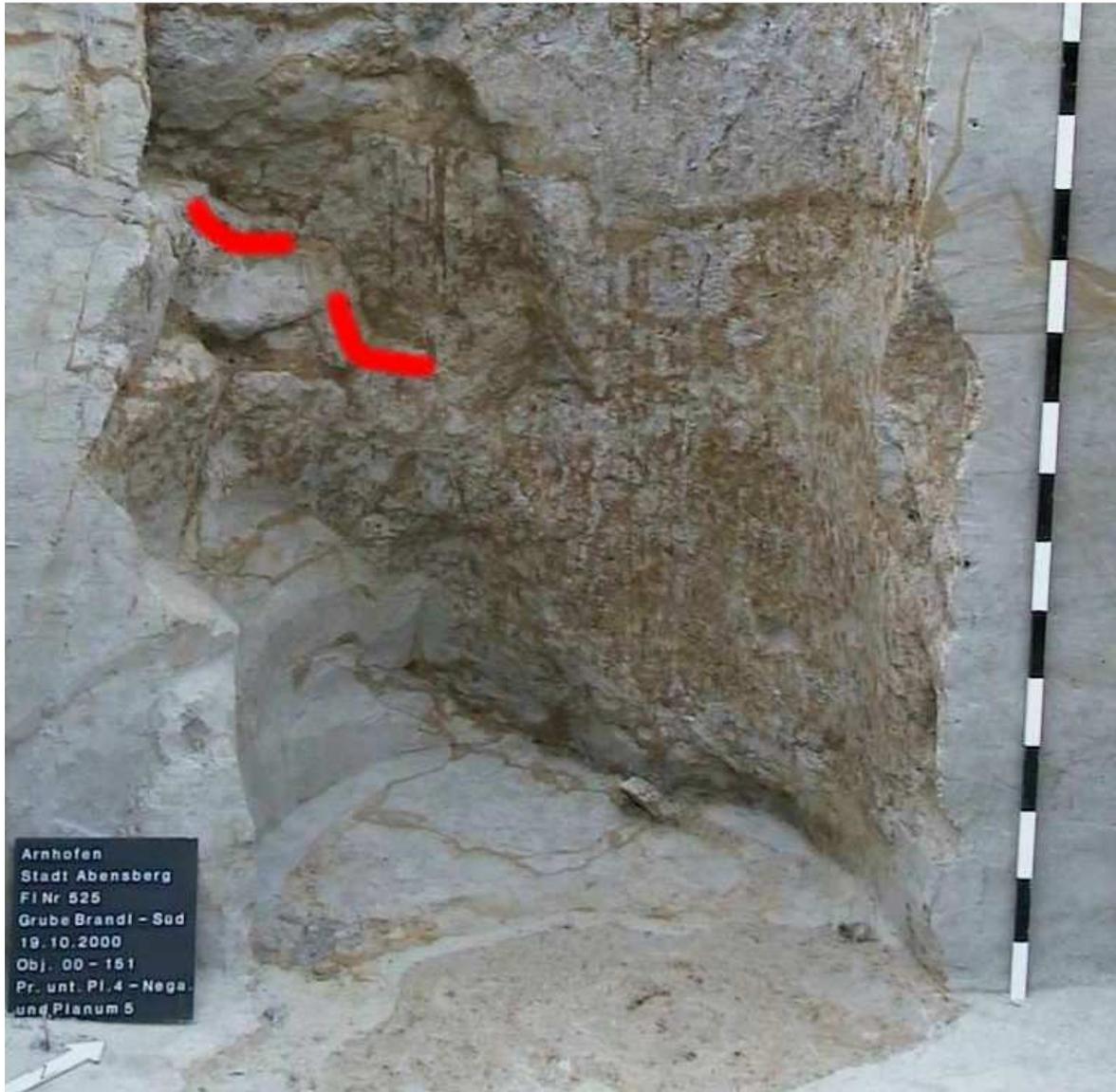


Abb. 1.4: Abensberg-Arnhofen. Blick auf die Wand von Schacht Nr. 151 zwischen 4,5 m und 5,8 m Tiefe unter der heutigen Oberfläche. Die halbrunde Hohlform zwischen der Tafel links und dem Maßstab rechts ist eine Hälfte des Schachtes Nr. 151. Seine Verfüllung wurde entfernt. An der teils von der Verfüllung rotbraun gefärbten originalen Schachtwand zeichnen sich zahlreiche Abdrücke eines spatenförmigen Arbeitsgerätes ab. Zwei Stellen, an denen sich die Blattform des Arbeitsgerätes besonders gut erkennen lässt, sind rot hervorgehoben. (Foto: Klaus Eisele, Kreisarchäologie Kelheim).

Beim steinzeitlichen Bergbau in Arnhofen wurde der Vortrieb demnach durch das Abstechen des Anstehenden von schräg oben ausgeführt. Dabei verwendete man vielleicht einen kurzen Holzspaten mit leicht gerundetem Blatt von der Art, wie sie im bandkeramischen Brunnen von Kückhoven gefunden wurden (WEINER 1993). Aber auch die Benutzung eines großen Schulterblattknochens kann nicht ausgeschlossen werden.

Schließlich konnte noch bei einem *Survey* im März 2001 eine kleine Kiesgrube auf der Fläche der Baumschule Lehmann entdeckt werden. Die Entdeckung dieses direkten Bergbaunachweises durch Ingo Bürger M.A. (Bamberg) und mich erfolgte unabhängig von der durch Alexander Binstener, der nach seinen Angaben genau diese Kiesgrube im Sommer 2000 entdeckte (ders. 2002). Er wurde allerdings bei einem Besuch auf der Ausgrabung in Arnhofen im Sommer 2001 von mir in gutem Glauben auf unsere Entdeckung hingewiesen. Zu diesem Zeitpunkt äußerte sich Binstener nicht zu seinen Kenntnissen. Die Beobachtung und Dokumentation der Kiesgrubenwände erfolgte dann durch das Team des Forschungsprojektes. Die Arbeiten erbrachten auch für diese Parzelle den Nachweis von Bergwerksschächten. Die Grube ist auf einer Luftbildkarte (Bildflug Nr. 95003/1, Bild-Nr. 700 vom 29.6.1995) vom Juni 1995 nicht vorhanden. Zum Zeitpunkt der Entdeckung war sie also maximal ca. 5 Jahre alt.

Auf der Grundlage der *Ausgrabungsergebnisse* aus den Jahren 1998 bis einschließlich 2001 basiert die hier im zweiten Kapitel vorgelegte Teilstudie zum Bergbau in Arnhofen. Da nach Abschluss des gemeinsamen Projektes zur Jahresmitte 2002 längst nicht absehbar war, ob, wann und wieviel noch ausgegraben werden musste, wurde beschlossen, die Auswertung auf dem Datenstand vom Jahresende 2001 durchzuführen. Tatsächlich konnte die Kreisarchäologie Kelheim noch von 2002 bis 2007 Ausgrabungen durchführen (RIND/ROTH 2007, 12; frdl. mdl. Mitt. M.-M. Rind), und weitere stehen vermutlich an (Stand 12/2007). Rückblickend ist zur Einschränkung der bearbeiteten Daten zu bemerken, dass die Berücksichtigung immer neuer Arbeitsstände Ressourcen verbraucht hätte, die so für die Umsetzung neuester Methoden verwendet werden konnten (vgl. u. 2.1.4.). Die Beschränkung auf die zahlreichen bis Ende 2001 erzeugten Daten ist damit auch von den Ergebnissen her zu rechtfertigen. Der Ausgrabungsstand vom Dezember 2001 bildet zwar die Datengrundlage für das zweite Kapitel, Berücksichtigung fanden natürlich aber auch alle neueren Kontextinformationen, beispielsweise wurden für die Chronologie alle bis Jahresanfang 2007 datierten Radiokohlenstoffproben genutzt. Über den Fortgang der Bodenfor- schungen seit 2002 informieren weitere Vorberichte und Kurzartikel (z. B. EISELE et al. 2003; RIND 2004; RIND/ROTH 2007).

Neben umfangreichen Informationen zur Archäologie des Bergbaus, gelang es auch *neue Erkenntnisse* zur Geologie (Gründer 2003; s. u. 1.4.) und zur Bodenkunde der Haldenschichten zu gewinnen (VÖLKEL/LEOPOLD 2001; LEOPOLD/VÖLKEL 2003; s. u. 1.4.). Auch die bisher zur Ausdehnung des Bergwerks vorgestellten Modelle bedürfen danach einer Revision (vgl. BINSTEINER 2001b), basieren sie doch auf der Fehlinterpretation eines Luftbildes (vgl. a. a. O. sowie BINSTEINER/ERNSTSON 2001; s. u. 1.4.). Schon 1995 hatte der Kreisarchäologe Michael-Maria Rind auf Luftbilder aus der Umgebung des Bergwerks hingewiesen (ders. 1995), für die es noch keine befriedigende Erklärung gab. Im Juni 2001 ergab meine Überprüfung dieser und weiterer Bilder im Luftbildarchiv des Bayerischen Landesamtes, dass es sich um umfangreiches Bildmaterial zum neolithischen Bergwerk handelte (s. u. 1.4.).

Daraufhin erfolgte noch im August 2001 eine Bodenradarprospektion durch Leopold und Völkel (dies. 2003; dies. 2004), sowie eine 2002 beendete Magnetometerprospektion durch Faßbinder (2003). Bei diesen beiden unterschiedlichen Prospektionsmethoden wurden eindeutig Schächte außerhalb der von Binsteiner postulierten Bergwerksfläche nachgewiesen.

Die Fortschritte bei der Erforschung des Arnhofeners Bergwerkes in den Bereichen Geologie, Bodenkunde und Luftbildarchäologie sind zu umfangreich und zu wichtig, um sie in Kurzform wiederzugeben. Sie werden deshalb in den folgenden Abschnitten eingehender besprochen.

1.4. Luftbildarchäologie

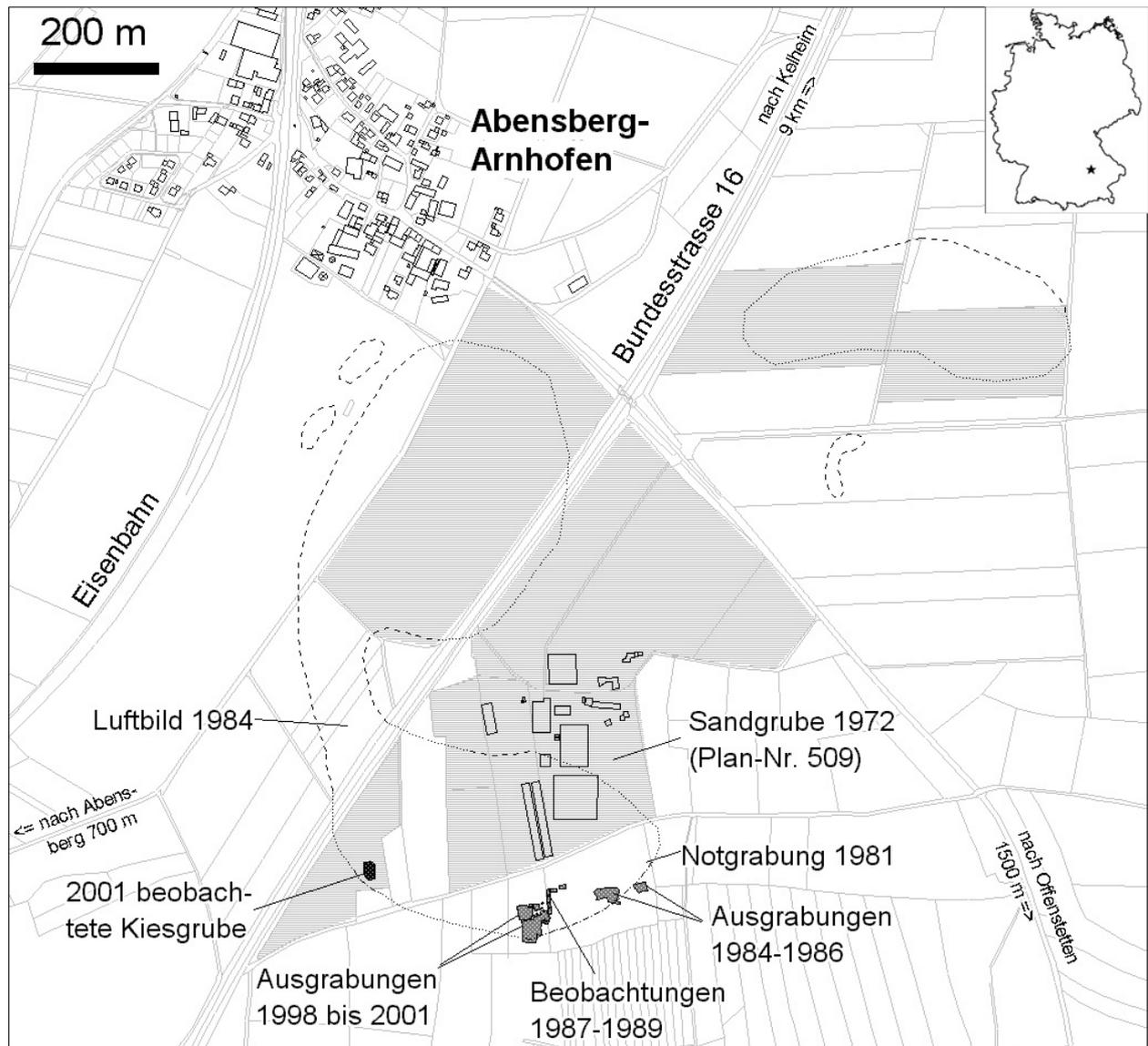


Abb. 1.5: Flurkarte Abensberg-Arnhofen.

Ausdehnung des Bergwerks und Lage der Grabungen bis 2001. Dunkelgrau gerastert sind die bis 2001 ausgegrabenen oder beobachteten Flächen. Die Grenze des Bergwerks ist teilweise durch Grabungen (Strichpunktlinie) und teilweise durch Luftbilder (gestrichelte Linie) belegt. In Bereichen ohne Erkenntnisse wurde die minimale Ausdehnung kartiert (feine Punktlinie). Die Ausdehnung der Baumschule (Stand 2003) ist hellgrau gerastert (Kartengrundlage: "Flurkarte" Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Ausschnitte der digitalen Flurpläne NO 34/10 und 33/10).

Das Bergwerk Arnhofen liegt in der Gemarkung Arnhofen, südöstlich des kleinen niederbayerischen Dorfes Arnhofen und nordöstlich der Stadt Abensberg (**Abb. 1.5**). Das Dorf ist Teil der Stadt Abensberg, weshalb sein amtlicher Name Abensberg-Arnhofen lautet. Stadt und Dorf wiederum gehören zum Landkreis Kelheim, dem nordwestlichsten Kreis des bayerischen Regierungsbezirkes Niederbayern.

Der in Abbildung 1.5. kartierte Ausschnitt liegt etwa in der Mitte zwischen den südbayerischen Städten Regensburg, Landshut und Ingolstadt, die alle ungefähr 30 km bis 40 km entfernt sind.

Die Flurkarte soll drei wichtige Aspekte verdeutlichen. Der erste ist die Lage der *Forschungsaktivitäten* bis 2002. Dafür sind alle Flächen, die bisher direkt mit dem Bergbau in Bezug gebracht werden konnten, mit Jahreszahl und Aktivität beschriftet. Auf diese Weise überblickt man alle forschungsgeschichtlich bedeutsamen Flächen.

Der zweite wichtige Punkt ist die *denkmalpflegerische Problematik*. Dafür sind alle Flächen mit einem grauen Raster markiert, die von der Baumschule genutzt werden. Die Gründung der Baumschule fand vor dem Juni 1979 statt (vgl. u. Abb. 1.7 Luftbild Mitte rechts). Moser erwähnt sie aber in seinem Artikel von 1978 nicht und auch auf seinem Foto der Sandgrube erscheint sie nicht (ders. 1978, 58 Abb. 10). Sie muss daher – ca. ein Jahr Drucklegung des Artikels vorausgesetzt – gerade zwischen dem um 1977 zu vermutenden Abschluss des Manuskriptes und Juni 1979 entstanden sein. Hätte die Bodendenkmalpflege damals schon vom Bergwerk Kenntnis gehabt, wären die Baumaßnahmen wohl kaum unbeobachtet geblieben. So aber fanden sämtliche Bauarbeiten ohne wissenschaftliche Begleitung statt. Im Bereich der Baumschule dürften die oberflächennahen Partien des Bergwerkes und besonders die Haldenschichten weitgehend bis vollständig zerstört worden sein. Anders als die herkömmliche Landwirtschaft greift eine Baumschule bis zu 2 m tief in den Untergrund ein. In dieser Weise werden heute über 20 ha der Bergwerksfläche genutzt. Dort ist davon auszugehen, dass die spezifische Bewirtschaftung die oberflächennahen Bereiche des Bergwerkes – die Haldenschichten – bereits weitgehend zerstörte. Höchstwahrscheinlich sind nur die tiefer liegenden Schachtabschnitte erhalten. Da die Schächte in den nördlichen Grabungsflächen aber auch nur mehr 3,3 m tief waren (RIND 2004, 60), dürften die Befunde des Bergbaus im Bereich der Baumschule in den letzten ca. 30 Jahren weitestgehend zerstört worden sein. Die erschreckend wenigen Parzellen mit Bergwerksresten, die noch nicht dieser Nutzungsart unterliegen, müssen bei einer rationalen Ausweitung der Baumschule als hochgradig bedroht gelten (Abb. 1.5). Es handelt sich um die Waldparzellen zwischen den Baumschulflächen und die Äcker unmittelbar westlich der B 16.

Eine hier nicht kartierte aber nichtsdestotrotz wichtige Flächennutzung stellt der Kiesabbau dar. Alle bisherigen Ausgrabungen ergaben sich aus dem Abbau von Sand oder Kies. Ungefähr ein Drittel der noch weitgehend ungestörten Bergwerksflächen liegt in einem Bereich, der für diese Nutzung geeignet wäre. Zu nennen sind hier die Flächen zwischen den Ausgrabungen und der Bundesstraße 16 (Abb. 1.5). Wie die archäologische Begleitung des Kies- und Sandabbaues zeigte, zerstören solche Eingriffe sämtliche Bergbaus Spuren vollständig.

Die hier vorgelegte Karte zur Ausdehnung des Arnhofener Bergwerkes versteht sich denn auch explizit als Unterstützung der denkmalpflegerischen Arbeit der Kreisarchäologie Kelheim. Aus denkmalpflegerischer Sicht ergeben sich zwei Prioritäten. Einmal ist zukünftiges Flächenwachstum der Baumschule auf Grundstücke ohne archäologische Bedeutung umzulenken. Zum anderen ist weiterer Kiesabbau nach Möglichkeit auf Ausweichflächen weiter südlich zu verlagern (Stand 09/2007). Der Blick auf die Karte zeigt, dass bei gutem Willen aller Beteiligten durchaus ein Schutz dieses international bedeutenden Bodendenkmals möglich ist.

Der dritte wichtige Aspekt ist schließlich die archäologische Bedeutung der zu vermutenden *Ausdehnung des Bergwerkes*. Die Grundlage für eine Neubewertung dieser Problematik wurde durch die Beobachtung einer kleinen Kiesgrube und die Neubewertung von Luftbildern gelegt (s. o. 1.3.; s. u.). Beim hier vorgeschlagenen Grenzverlauf ergibt sich eine Minimalfläche von ca. 40 ha. Je nach zugrunde gelegter Schachtdichte (min. 11/Ar, max. 33/Ar) ergeben sich Schachtzahlen zwischen 44.000 und 132.000 für diese Fläche (vgl. u. 2.3.).

Die Belege für den Verlauf der *Bergwerksgrenze* sind dabei von unterschiedlicher Qualität. Der Grenzverlauf ist dort bewiesen, wo die Grenze bei den Ausgrabungen erfasst wurde (Strichpunktlinie in Abb. 1.5.; vgl. o. Abb. 1.1). Wo sie dagegen im Luftbild erscheint, ist ihre Lage nur zu vermuten, denn die Interpretation von Luftbildern birgt größere Unwägbarkeiten (Strichlinie in Abb. 1.5; s. u.). Auf diesen Punkt wird weiter unten noch detailliert eingegangen. Die Verbindung zwischen diesen Grenzabschnitten ist dagegen schließlich rein spekulativ (Punktlinie in Abb. 1.5). Hier wurden gerundete Grenzverläufe angenommen, ähnlich der Art, wie sie sich in den Luftbildern zeigen. Ein Wert von 40 ha, wie er hier für die Gesamtfläche veranschlagt wird, ist also (noch) nicht eindeutig zu belegen. Hier müssten erst weitere erfolgversprechende Prospektionen, etwa mit modernem, dreidimensionalen Georadar, durchgeführt werden. Angesichts der Bedrohungslage scheint dabei Eile geboten.

Egal wie weit man diesem Vorschlag für eine Grenzziehung folgen möchte, ein Punkt ist klar. Die bisherigen Ausgrabungen, sowohl die der 1980er Jahre, als auch die seit 1998, haben nur jeweils den Südostrand des Bergwerkes erfasst.

Grundlage für das neue Modell zur Größe sind zahlreiche *Luftbilder*. Schon seit 1979 wurde die Umgebung des damals noch unbekanntes Bergwerkes durch das Bayerische Landesamt für Bodendenkmalpflege mit Luftbildern dokumentiert. Eines davon zeigt in einem Acker direkt westlich der Bundesstraße 16 deutlich Bewuchsmerkmale, die allgemein als Bergbaus Spuren interpretiert werden (**Abb. 1.6**; vgl. WEISGERBER 1993, 31, Abb. 24 [=BLfD-Luftbilddokumentation Archiv-Nr. 7136/044b-3615i4]).

Westlich der Bundesstraße zeichneten sich hier die Schächte auf einer Parzelle in der Bildmitte einzeln in einem geeigneten Pflanzenbewuchs ab. Die unmittelbar östlich und westlich angrenzenden Nachbarfelder waren jedoch mit Pflanzen bestanden, die weniger gut auf Unterschiede im Untergrund reagierten. Das Bewuchsmerkmal konnte sich also folglich im close-to-infrared-Film dort nur als schemenhafter Streifen ausbilden.

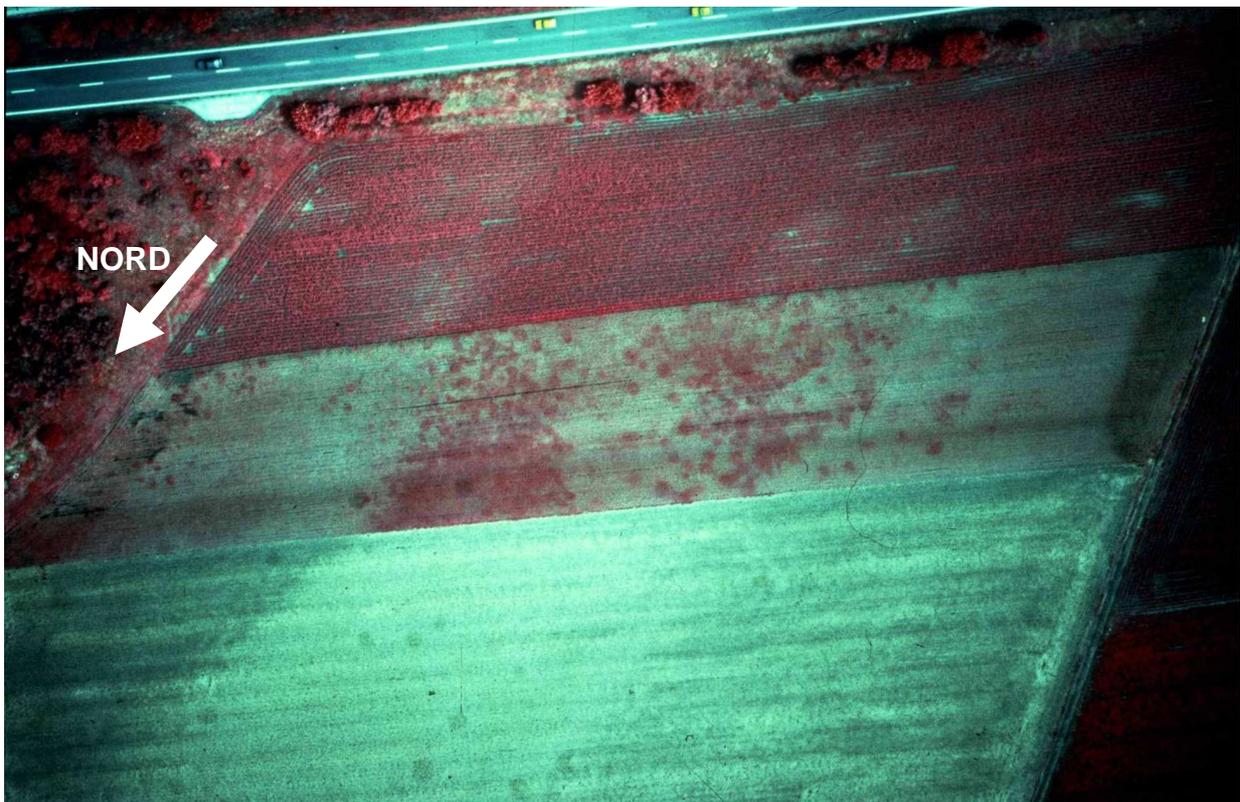


Abb. 1.6: Abensberg-Arnhofen. Luftbild von Flächen unmittelbar westlich der Bundesstraße 16 mit einem im Farbspektrum verschobenen Filmmaterial (CTR = close-to-infrared). Über die gesamte Fläche zwischen der Bundesstraße 16 und der unteren Bildkante zieht sich ein etwa Nord-Süd verlaufender Streifen mit Bergwerksspuren, die an Bewuchsmerkmalen erkennbar sind (BLfD-Luftbilddokumentation, Foto: Dieter Braasch 13.07.1984, Archiv-Nr. Nr.7136/044b, Dia 3615i4; Parzellen mit Bewuchsmerkmalen von oben: Nr. 863, Nr. 863/1 und Nr. 862/1; die Feldeinteilung entspricht nicht den Parzellen; vgl. o. Abb.1.5).

Der Zusammenhang zwischen beiden Merkmalsarten ist jedoch eindeutig zu erkennen. Die von Binsteiner vorgeschlagene Grenzziehung ist also schon allein bei einer wissenschaftlich-kritischen Betrachtung des Luftbildes nicht nachvollziehbar (vgl. BINSTEINER/ERNSTSON 2001; BINSTEINER 2001b). Schließlich ist nur die Art des Bewuchsmerkmals betroffen, nicht jedoch seine Präsenz. Abgesehen davon ist das von Binsteiner zur Bestätigung seiner Ansicht angeführte Prospektionsverfahren der Refraktionsseismik nur geeignet, um großflächige Schichtgrenzen aufzuspüren, nicht jedoch – im Vergleich dazu – kleine archäologische Befunde von der Art der Bergbauschächte.

Und dass unterschiedliche geologische Schichtverläufe den Schachtbau nicht beeinträchtigten, wie von Binstener vermutet, war schon auf der auch ihm bekannten Ausgrabung im Sommer 2001 klar (vgl. u. Abb. 1.8). Diese Interpretation des Luftbildes wurde durch eine Georadarprospektion von Leopold und Völkel bestärkt (dies. 2003; dies. 2004). Auf dem Acker am unteren Bildrand von Abbildung 1.5. konnten sie Befunde erkennen, die in ihrer Form Bergwerksschächten entsprachen.

Eine *Magnetometerprospektion* durch das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege erbrachte schließlich 2002 den geophysikalischen Beweis (FAßBINDER 2003, 56 Abb. 24), dass auch das streifenförmige Bewuchsmerkmal auf dem nordwestlichen Acker auf Bergbaubefunde zurückgeht (Abb. 1.6. unten). Das Magnetogramm deckt diesen Acker und einen Teil des Ackers mit den einzelnen Schachtmerkmalen ab. Die Befunde auf beiden Flächen entsprechen sich völlig (FAßBINDER 2003, 56 Abb. 24). Nirgends ist auf dem Magnetogramm eine Grenze zu sehen. Die als Bergbaubefunde zu deutenden Anomalien laufen ohne jede Unterbrechung über den gesamten prospektierten Bereich. Die von Binstener postulierte Grenze existiert ganz einfach nicht (vgl. BINSTEINER/ERNSTSON 2001; BINSTEINER 2001b). *Der Bergbau erstreckt sich in einem Streifen von Süd nach Nord über den gesamten in Abbildung 1.4 gezeigten Bereich.*

Neben diesem Luftbild waren aber schon länger andere, *unbewertete Luftbilder* bekannt (RIND 1995). Eine Durchsicht der Luftbilder im Archiv des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege in München im Juni 2001 ergab ein überraschendes Ergebnis (**Abb. 1.7**). Mehrere Luftbildfundstellen sind demnach ebenfalls dem Bergwerk zuzurechnen (Fundstellen-Nrn. 7136/40-2, /44b-2, /44b-3, /44b-4, /79-3 und /79-4). Eine gemeinsame Durchsicht der Bilder mit Walter Irlinger (damals BLfD/Luftbildarchiv) erhärtete den Verdacht, es handele sich um Luftbilder von Teilen des Bergwerkes. Von den zahlreichen Bildern besitzen aber nur einige genug markante Punkte, um sie auf der Grundlage des Flurplanes zu entzerren. Luftbilder, die nicht entzerrt werden konnten, sind hier nicht abgebildet.

Neben einem zweiphasigen Altwegenetz sind auf einem CTR-Foto westlich der B 16 deutlich Bewuchsmerkmale zu sehen, die exakt denen auf der allseits akzeptierten Aufnahme entsprechen, die hier als Abbildung 1.5. geführt wird. Tatsächlich stammen die Aufnahmen vom gleichen Film des gleichen Bildfluges! Dieses Bild und andere nicht entzerrbare Luftbilder vom gleichen Film (Nrn. 7136/044b, 3615i-10, -11 und -22) sowie weitere Schwarzweißaufnahmen (Nrn. 7136/044b, 4387-9 und -10) sind die Grundlage für die Grenzziehung im Bereich westlich der B 16.

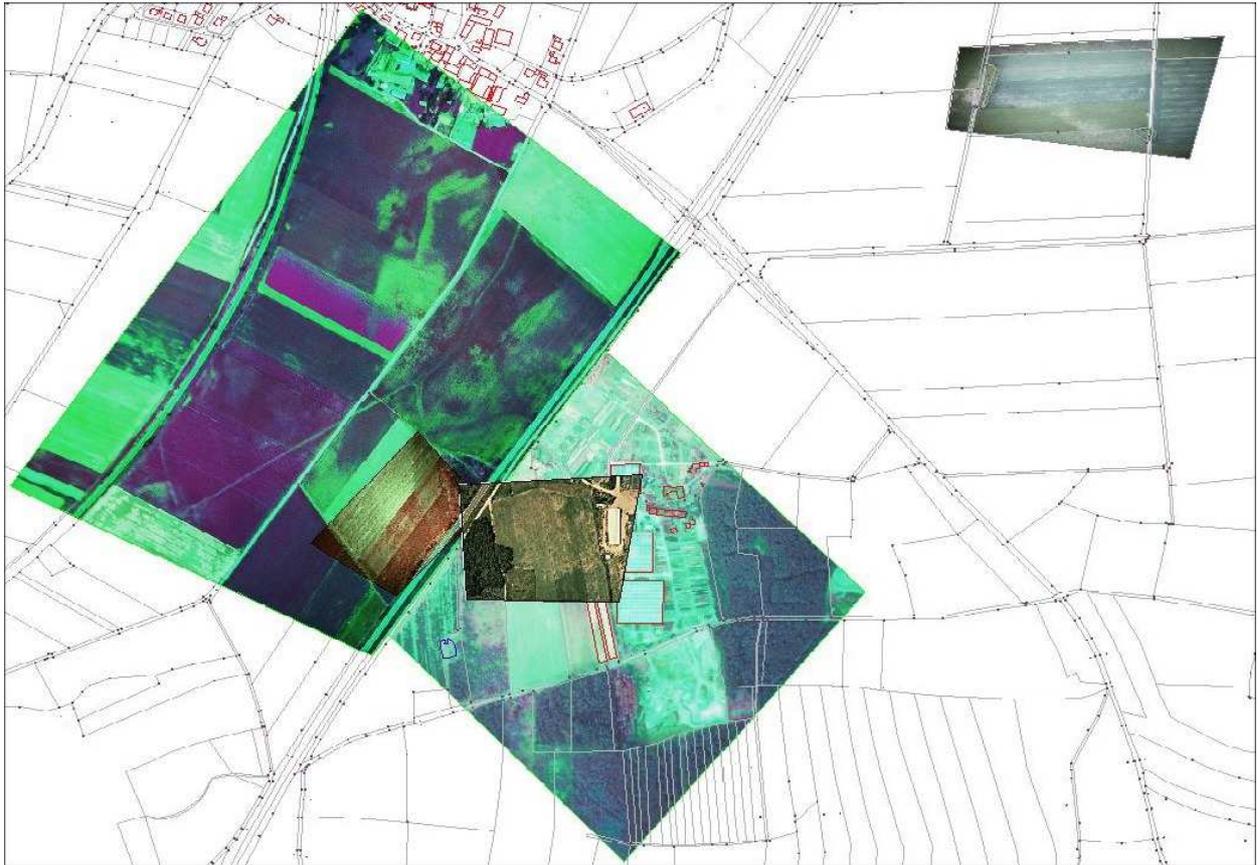


Abb. 1.7: Abensberg-Arnhofen.

Montage aller entzerrbaren archäologischen Luftbilder mit Bergwerksflächen. Daneben existieren noch zahlreiche weitere Bilder, die aufgrund einer zu geringen Anzahl von Passpunkten nicht entzerrt werden konnten. Die 2001 beobachtete kleine Kiesgrube ist blau umrandet (Alle Luftbilder BLfD-Luftbilddokumentation; Fotos: Dieter Braasch Nr. 1. bis 4. und Klaus Leidorf Nr. 5; 1. links oben: 13.07.1984, Archiv-Nr. 7136/044b, 3615i-31; 2. links mitte: 13.07.1984, Nr. 7136/044b, 3615i-4 [= Abb. 1.6 hier oben]; 3. rechts mitte: 3.06.1979, Nr. 7136/040, 273-18; 4. rechts unten: 13.07. 1984, Nr. 7136/044b, 3615i-36; 5. rechts oben: 21.05.1992, Nr. 7136/079-4, 6642-32; Kartengrundlage: "Flurkarte" Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Ausschnitte der digitalen Flurpläne NO 34/10 und 33/10).

Etwa in der Mitte von Abbildung 1.7. befindet sich ein kleineres, normales Farbfoto. Es zeigt unmittelbar nördlich der Ausgrabungen auf einem Acker (Abb. 1.7. Nr. 3: rechts mitte Nr. 7136/040, 273-18), der später von der Baumschule Lehmann genutzt wurde, klar ein flächiges dunkelgrünes Bewuchsmerkmal. An seinem Nordrand sind einzelne Schächte als Bewuchsmerkmal sichtbar. Gleiches ist auf weiteren Schwarzweißaufnahmen zu sehen (Nr. 7136/040, 2515-26 bis -31).

Die im Luftbild sichtbaren Schächte liegen genau dort, wo Binsteiner aufgrund eines nur 0,5 m tiefen Schnittes einen Übertagebergbau mit flachen Gruben, sogenannten Kuhlen oder Pinggen, vermutete (ders. 1990, 15f. Abb. 3 Schnitt A und 30), ohne die Sohle der archäologischen Befunde erreicht zu haben (a. a. O., Beil. 1,1).

Der Vergleich seines Schnittes mit den hier ausgewerteten Ausgrabungen zeigt (vgl. z. B. Abb. 1.3), dass damals kein Übertagebau angeschnitten wurde, sondern nur die oberen Bereiche der Haldenschichten eines Untertagebergbaues (vgl. auch u. 2.3.). Die 2001 untersuchten Haldenschichten besaßen in den nördlichen Grabungsflächen Mächtigkeiten von über 1 m (vgl. auch RIND 2004, Taf. 2,3). Ein Schnitt von nur 0,5 m Tiefe konnte also die Situation gar nicht richtig erfassen.

Damit ist nicht nur *Binsteiners Modell* zur Ausdehnung des Bergwerks als überholt anzusehen, auch sein evolutionäres Modell zur Entwicklung des Bergbaus ist hinfällig. Laut Binsteiner habe der Bergbau dort als Übertagebergbau mit Kuhlen oder Pingen begonnen (ders. 1990, 30), wo hier im Luftbild Schächte zu erkennen sind. Er habe sich dann nach Süden, einem vermeintlich abtauchenden Flöz folgend, erst im Laufe des Neolithikums zum Untertagebau entwickelt. Spätestens seit der Entdeckung des altneolithischen Brunnens von Kückhoven ist bewiesen, dass man in Mitteleuropa in der frühen Jungsteinzeit um 5050 v. Chr. bereits Untertagearbeiten bis in eine Tiefe von über 13 m vornehmen konnte (vgl. LEHMANN 1999, 297ff.). Untertagebau war also seit Beginn des jungsteinzeitlichen Abbaues technisch möglich. Damit gibt es für das evolutionäre Modell auch kein technikgeschichtliches Argument mehr. Der Bergbau wurde zwar höchstwahrscheinlich von Nordwesten her in den Bereich der Ausgrabungen vorangetrieben (vgl. u. 2.1.6. und 2.1.7.), genauso wie Binsteiner es annahm, wo er aber begann ist unklar.

Bemerkenswert sind im Hinblick auf die *Ausdehnung des Bergbaues* noch Luftbildbefunde im Nordosten der Flurkarte. Nicht nur das hier entzerrte Farbfoto (Abb. 1.7. Nr. 5: 7136/079-4, 6642-32), sondern auch eine Reihe von Schwarzweißaufnahmen zeigen östlich von Arnhofen ein inselartig isoliertes Areal mit Schachtbau (Nrn. 7136/079-4, 6188-26A und -29A). Ein weiteres, kleineres inselartiges Areal liegt unmittelbar nordöstlich der Straße von Arnhofen nach Offenstetten (Nrn. 7136/079, 4387-11bis -13; vgl. o. Abb. 1.5). Auch auf den Flächen zwischen der B 16 und dem Dorf Arnhofen zeichneten sich solche 'Inseln' ab. Eine derartige Aufteilung scheint zunächst überraschend. Nimmt man jedoch an, dass der Bergbau allen erreichbaren Hornsteinflözen folgte, so könnte sich durchaus eine solche Situation entwickelt haben.

Die für Arnhofen angenommene Aufteilung in *mehrere Abbauareale* ist bei jungsteinzeitlichen Bergbaurevieren nicht ungewöhnlich. So besteht das jungsteinzeitliche Feuersteinbergbaurevier von Rullen, Gemeinde Sankt-Martins-Vouren, im Nordosten Belgiens aus mindestens fünf isolierten Abbauarealen, die teilweise über einen Kilometer auseinanderliegen (FELDER 1998, 175 Fig. 138).

Auch das berühmte Bergwerk von Rijckholt-St.Geertruid ist nur Teil eines ganzen Reviers von Minen, das sich über mehr als vier Kilometer entlang des östlichen Talhanges der Maas erstreckt (a. a. O., 173 Fig. 137). Ebenso bestehen die benachbarten jungsteinzeitlichen Bergbaureviere von Valkenburg (a. a. O., 181 Fig. 144) und Cadier en Keer (a. a. O., 185 Fig. 145) aus jeweils einer ganzen Reihe einzelner Areale. Das große tschechische Bergwerk von Krumlovský les umfasst ebenfalls mehrere getrennte Abbauareale, die sich über etwa drei Kilometer entlang des Ostabhanges des Krummlauer Waldes hinziehen (vgl. OLIVA 2006). Bedenkt man, dass in Arnhofen wahrscheinlich über 3000 Jahre hinweg neolithischer Bergbau betrieben wurde (s. u. 2.1.2.), so erscheint die Vorstellung eines in die Fläche ausgreifendes Revieres mit inselartig isolierten Arealen nicht abwegig. Berücksichtigt man zudem noch neben der zeitlichen Tiefe die je nach Zeitabschnitt unterschiedliche Bergbauintensität (vgl. u. 2.1.2. und 2.3.), lässt sich die vorgeschlagene Gestalt des Arnhofener Reviers gut mit den anderen Erkenntnissen vereinbaren.

Diese Situation wirft die Frage nach dem *Ausgangspunkt* des neolithischen Bergbaus auf. Er könnte irgendwo in mehreren hundert Metern Entfernung außerhalb der ausgegrabenen Flächen begonnen haben. Dabei ist auch denkbar, dass man ein heute nicht mehr erhaltenes, obertägig ausstreifendes Flöz antraf. Aufgrund der paläolithischen Nutzung des Hornsteins (s. u. 2.1.2.) ist letzteres zumindest wahrscheinlich – denn irgendwie müssen die Menschen ja einmal auf das Vorkommen gestoßen sein. Wo diese Stelle allerdings lag, ob vielleicht in der heutigen Ortslage von Arnhofen, unter der Eisenbahntrasse, oder noch weiter oben am Hang des westlich gelegenen Jurahügelzuges ist reine Spekulation.

Angesichts der Gestalt des Revieres kann man auch nicht mehr ausschließen, dass auch die unmittelbar nördlich von Abensberg gelegenen Jurahügel des Galgenberges, des Linsberges und des krummen Buckels einbezogen waren. Für alle drei kartierte Binstener bei seiner geologischen Umfelduntersuchung des Bergbaus Hornsteinvorkommen (ders. 1990 Beil.1 Nrn. 15, 14 und 13). Eine eigene Begehung des modernen Steinbruchs am Linsberg ergab, dass dort genau der gleiche Hornstein zu finden ist, der auch im Arnhofener Flöz angetroffen wird. Auch in den südlich des Bergwerkes im Wald gelegenen Kalksteinbrüchen und Sandgruben sind Hornsteinvorkommen aufgeschlossen (vgl. a. a. O. Nr. 12). Der dort auffindbare Hornsteintyp ist aber schon rein visuell gut vom Arnhofener Hornstein zu unterscheiden. Am Galgenberg und am Linsberg konnten bis heute keinerlei prähistorische Abbauspuren gefunden werden (frdl. mdl. Mitt. Michael-Maria Rind).

Interessant ist in diesem Zusammenhang besonders der kleine Höhenzug des Krummen Buckels auf der Mitte zwischen Arnhofen und Abensberg. Er befindet sich gerade außerhalb von Abbildung 1.6 nur 700 m westlich der kleinen bewaldeten Kuppe, die unmittelbar an der Westseite der B 16 liegt. Am Krummen Buckel treten Malm-sedimente zutage. Das Gelände wurde in den 1980er Jahren mit einer Schulungsstätte überbaut. Am Krummen Buckel liegen heute die nächsten obertägig zugänglichen Hornsteinvorkommen (GRÜNDER 2003, 20).

Wäre der Abbau einem *obertägigen Vorkommen*, das auch heute noch erhalten ist, ‘in die Tiefe folgte’, dann ist der Hornsteinaufschluss am Krummen Buckel der wahrscheinlichste Kandidat. Für diese Variante spricht allerdings kein einziges Indiz.

Im Zusammenhang mit der Frage nach dem Beginn des steinzeitlichen Bergbaus sind die zahlreichen neuen Erkenntnisse zur Geologie des Arnhofener Untergrundes von Bedeutung, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

1.5. Geologie

Die neuen Erkenntnisse zur Geologie des Arnhofener Untergrundes zeigen ein differenzierteres Bild, als man es aus den Altgrabungen kannte.

Die Kreisarchäologie Kelheim hatte für die fachwissenschaftliche Untersuchung der komplizierten geologischen Verhältnisse eine Zusammenarbeit mit dem Institut für *Geo- und angewandte Ingenieurwissenschaften* der TU München initiiert. In diesem Rahmen verfasste Stefan Gründer (Neumarkt) eine geologische Diplomarbeit an der Universität München (GRÜNDER 2003). Auf seinen Erkenntnissen und der grundlegenden Arbeit von Binstener (ders. 1990) fußen die folgenden Passagen zur Geologie.

Topographisch gesehen befindet sich das Bergwerk von Arnhofen direkt südöstlich des orographischen Albrandes bei Arnhofen in einer Senkenlandschaft. Die Senke erstreckt sich in Form eines gleichseitigen Dreiecks mit etwa 5 km Seitenlänge. Das weitgehend ebene Gelände reicht von Abensberg im Südwesten und dem östlich von Offenstetten gelegenen Weiler Scheuern im Südosten bis kurz vor Oberteuerting im Norden. Die Senke umfasst die gesamte Fläche des Bergwerkes. Die absolute Höhe im Bereich des Bergwerkes schwankt nur um etwa 5 m zwischen ca. 365 m NN im Südwesten und 370 m NN im Zentrum. Das gesamte Areal ist beinahe völlig eben mit nur leichten Bodenwellen am nordöstlichen Rand und einer flachen baumbewachsenen Kuppe westlich der B 16 (vgl. o. Abb. 1.6). Heutzutage gibt es in unmittelbarer Umgebung des Bergwerks kein Fließgewässer. Der nächste Bach fließt am Ostrand der Senke in etwa 2 km in die Ebene hinein und verliert sich dann in einem Ponor (vgl. LESER 1993, 182). Der westliche Teil der Senke mit dem Bergwerk ist dagegen ein Trockental ohne Wasserläufe. Die geringe Reliefenergie und das Fehlen eines Fließgewässers sind die Gründe dafür, dass die Oberfläche im Bereich des Bergwerkes keine bedeutsame Erosion aufweist (VÖLKEL/LEOPOLD 2001). Hier stößt man auf die in der Archäologie seltene Situation einer gegenüber dem prähistorischen Zustand weitestgehend unveränderten Landschaftsoberfläche. Auch die anderen in dieser Senkenlandschaft liegenden archäologischen Fundplätze dürften – bis auf Verbnungen – eine ungewöhnlich gute Erhaltung aufweisen und verdienen deshalb besondere wissenschaftliche Beachtung (vgl. RIND 1995).

Die *Flächennutzung* im Bereich des Bergwerks führt, wie bereits erwähnt, zu einer besonderen denkmalpflegerischen Problematik. Die Bereiche im Winkel zwischen der westlich gelegenen B 16 und der östlich verlaufenden Straße Arnhofen-Offenstetten werden zum Teil als Baumschule, Kiesgrube oder Deponie genutzt. Der Rest der Bergwerksfläche ist von Wald bestanden.

Die Flächen westlich und nördlich dieser beiden Straßen werden teils als Acker und teils als Baumschule genutzt – abgesehen von der bewaldeten Kuppe. Die B 16 selbst zerschneidet das Bergwerk ungefähr in zwei Hälften.

Nach meinen Erkundigungen in Arnhofen ist der *Grundwasserspiegel* in Brunnen im südöstlichen Dorfgelände erst bei mindestens 12 m unter der heutigen Oberfläche anzutreffen – eine wichtige natürliche Voraussetzung für steinzeitlichen Untertagebergbau.

Die *Grundlagen der Geologie* wurden von Alexander Binstener vorgestellt (ders. 1990). Das Bergwerk liegt in der Abensberg-Pullacher Wanne am Südrand des Jura. Idealerweise sind im Untergrund drei geologische Schichten anzutreffen. Der Boden der Wanne besteht aus Jurakalken (Malm ζ_{1+2}). Darüber folgen tertiäre Sande des mittleren bis oberen Miozän, die sogenannte Obere Süßwassermolasse. Die Oberfläche des westlichen Teils der Arnhofener Senke wird von quartären Schottern gebildet, die zurückblieben, als die Abens am Ende des Mittelpleistozäns ihren Lauf änderte. Zuvor war sie von Abensberg nach Norden zur Donau geflossen. Seit der Laufänderung fließt sie von Abensberg nach Westen und mündet bei Eining in die Donau. Von ihrem ehemaligen pleistozänen Flussbett verblieben die sogenannten Altabensschotter.

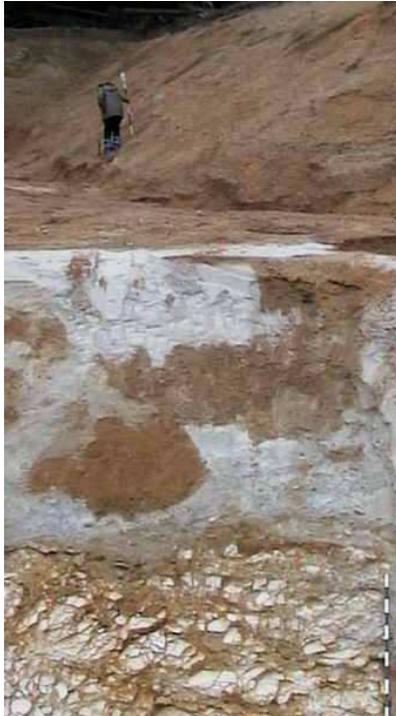


Abb.1.8: Arnhofen. Blick auf Böschungen durch die geologischen Schichten. Im Vordergrund der Jurakalk, darüber die weißgraue Süßwassermolasse (mit braunen Schachtfüllungen) und dann die rostbraunen Altabensschotter.

Die *ideale Schichtenabfolge* besteht demnach von oben nach unten aus den Altabensschottern, der Oberen Süßwassermolasse und dem Malmkalk. Dabei fallen die Schichten insgesamt leicht nach Süden ein. Das Hornsteinflöz erstreckt sich in einem mehrere Dezimeter starken Band oberhalb der Schichtgrenze zwischen dem Jurakalk und den ihn überdeckenden Sedimenten.

Einen Eindruck von der Abfolge vermittelt die **Abbildung 1.8**. Die Oberkante der Malmkalke variiert im Untergrund stark (GRÜNDER 2003). In einem Bereich von wenigen Metern Durchmesser in der Horizontalen können mehrere Meter Differenz in der Vertikalen auftreten. Dabei reicht der Zustand des Kalkes von frisch bis völlig verwittert. Dieser Zustand geht auf Verkarstung des Kalkes zurück. Die Verkarstung erfolgte zumindest in ihren letzten Phasen unterirdisch, d.h. sie schritt auch dann weiter voran, als die Kalke schon mit anderen Sedimenten überdeckt waren.

Auf diese Weise bildeten sich im Untergrund verschieden große Strukturen aus, die mit nachbrechendem Material aus den darüberliegenden Schichten verfüllt wurden. Größere derartige *Karstphänomene* sind demnach als Dolinen zu bezeichnen.

Bei solchen Einstürzen wurden Teile des Arnhofer Flözes mit in die Tiefe gerissen – was für den Bergbau einem Aussetzen des Flözes gleichkam (vgl. GRÜNDER 2003, 67 Abb. 50). Solche Situationen treten vereinzelt auf, sie sind aber nicht die Regel. Einzelne Schächte trafen wohl einmal einen solchen Abschnitt ohne Flöz an. In den gesamten Projektgrabungsflächen fand sich jedoch nur eine einzige größere Doline (s. u. 2.3. Abb. 2.50 und 2.52), die das Flöz im Umkreis von mehreren Metern zerstörte. Die Verkarstung erzeugte zwar einen stark unregelmäßigen Flözverlauf, das Antreffen des Flözes beim Bergbau wurde dadurch aber nicht zum Glücksspiel.

Der in Arnhofen abgebaute *Hornstein* stammt aus den Jurakalken (BINSTEINER 1990). Bei der Verwitterung des Kalkes blieb der verwitterungsresistente Hornstein zurück und gelangte in verschiedenartige sekundäre Lagerstätten. Teils blieben bei der Kalkverwitterung tonige Rückstände zurück, der sogenannte Residualton. Da größere Kalkvolumina durch die Zersetzung zu geringeren Residualtonschichten verwittern, sammelten sich auf diese Weise größere Mengen an Hornstein in der Tonschicht an. Während im Jurakalk Abstände von mehreren Dezimetern zwischen den einzelnen Stücken liegen, ist das Hornsteinvorkommen im Residualton daher so stark verdichtet, dass man von einem Flöz sprechen kann (s. u. 2.3. Abb. 2.51). Das Flöz im Verwitterungston wurde fast nur bei den Altgrabungen in der ehemaligen Grube “Buchenrieder“ angetroffen.

Bei den neuen Grabungen in der Kiesgrube “Brandl“ ‘schwebte‘ das Flöz oberhalb der Malmbankante in den Sanden der Oberen Süßwassermolasse (GRÜNDER 2003). Gründer konnte experimentell zeigen (a. a. O. 46ff.), dass diese Flözstruktur ebenfalls mit Karstprozessen zu erklären ist. Dabei ersetzen die Feinsande der Süßwassermolasse Schritt für Schritt den ausgelösten Kalk. Der Hornstein wird dabei kaum bewegt, lediglich Verstellungen der ursprünglich der Malmbankung folgenden Hornsteinstücke treten auf. Auch die ‘rückstandsfreie‘ Kalkverwitterung erzeugt auf diese Weise eine Anreicherung der Hornsteine im Lockergestein über dem Malmkalk – geologisch werden Sande und Kiese auch als Lockergestein bezeichnet. Im Untergrund der großen Haldengrabung wurden die Sande vermutlich durch die Altgrabungen teilweise ausgeräumt, das Flöz jedoch blieb erhalten (RIND 2004, 59). Dadurch sind dort die Hornsteine von einer Matrix aus Geröllen umgeben, ohne selbst als Geröll transportiert worden zu sein.

An diesen geologischen Befund kann man auch eine Spekulation zur Art des Hornsteinvorkommens knüpfen, das in der *jüngeren Altsteinzeit* aufgeschlossen wurde (vgl. u. 2.1.2.), und dem folgend sich der jungsteinzeitliche Abbau entwickelte. Die jüngsten Altabensterrassen liegen direkt östlich von Arnhofen (vgl. ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 5 Abb. 3). Dort dürften Eingriffe des pleistozänen Fließgewässers energiereicher gewesen sein, als in den hier untersuchten Flächen. Dass Arnhofener Hornstein bei den Flussbettverlagerungen der Altabens tatsächlich in deren Schotter geriet, belegt ein Artefakt mit stark abgerollter Rinde, das Christoph Herbig bei einem Besuch 1998 aus einer Haldenschicht am Südrand der späteren Ausgrabung aufblas (frdl. mdl. Mitt. Dr. Christoph Herbig, Oberrodenbach). Solche verlagerten Hornsteine wären ab der Würmeiszeit für die altsteinzeitlichen Menschen entlang der nun trockenen Terrassen gut zugänglich gewesen. Ein weiteres Indiz für diese Annahme bildet der Verlauf der Bergwerksgrenze (s. o. Abb. 1.5). Wenn man annimmt, dass der Bergbau zunächst solchen Hornsteinen galt, die in den Altabensschottern oberflächennah vorkamen, wird die langgezogene und gewundene Form des Bergwerkes erklärbar, die einem Flusslauf nicht unähnlich ist. Die inselhaften Areale mit Bergbau lägen dann dort, wo weniger großflächige Erosionsereignisse kleinere, unzusammenhängende Vorkommen nahe der Oberfläche erzeugten.

Folgt man dieser Annahme, dann ist anzunehmen, dass die alt- und mittelsteinzeitlichen Abbau-spuren weitestgehend vom jungsteinzeitlichen Bergbau zerstört wurden.

Zum *Flöz* ist noch anzumerken, dass es wie die geologischen Schichten dem großräumigen Trend folgt und auf der Pl.-Nr. 525 allgemein nach Süden einfällt. Am Südrand des Bergwerkes in der Kiesgrube erreicht es Tiefen von über 8 m. Die bei der Altgrabung gemachte Aussage über den Zusammenhang von Bergwerksausdehnung und Lagerstättenniveaus kann hier bestätigt werden. Erreichte ein Schacht bei etwa 8 m Tiefe keinen Hornstein, wurden in diesem Bereich keine weiteren Gewinnungsversuche mehr vorgenommen.

Auf die *Rohmaterialbeschreibung* des Arnhofener Hornsteins kann hier verzichtet werden, da dies in anderen Arbeiten schon ausführlich erfolgte (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 5; BINSTEINER 1990, 4ff.). Es sei lediglich auf einige neue Beobachtungen zu den natürlichen Oberflächen der Rohstücke hingewiesen. Die Rinde fällt bei Stücken aus dem Flöz in den miozänen Sanden sehr dünn (<0,5mm) aus und ist von weißer Farbe. Wo das Flöz in die Schotter verlagert wurde, können rötlichbraune ('rostfarben') und schwärzlich gefärbte Rindenpartien auftreten, wobei die Rinde von gleicher Dicke ist. Bei Hornstein aus dem miozänen Flöz sind die natürlichen Sprungflächen entlang der Schmalseiten von Hornsteinplatten und die natürlichen Klüfte von Hornsteinknollen häufig von einem schwarzen Überzug bedeckt.

Eine dickere kalkige Rinde war an Rohmaterial aus den Projektgrabungen nur selten zu beobachten.

Festzuhalten bleibt, die *geologischen Gegebenheiten* sind besonders wichtige natürliche Voraussetzungen für den jungsteinzeitlichen Bergbau.

Die eine ist der *tiefliegende Grundwasserspiegel*. Selbst die tiefsten Schächte waren nie durch größere Wassereinbrüche gefährdet. Kleine Wassereinbrüche können aber auftreten, wenn man tiefer in den Malmkalk hineingräbt. Dann ist es möglich, dass kleinräumige Grundwasserkörper angeschnitten werden (vgl. GRÜNDER 2003, 60). Das unbemerkte Anschneiden einer solchen Wasser führenden Tasche ließ den für das geologische Profil angelegten Schnitt an der Sohle mit mehreren Dezimetern Wassern voll laufen. Diese Problematik dürfte dafür verantwortlich gewesen sein, dass der jungsteinzeitliche Bergbau fast nie tiefer als wenige Dezimeter in den Kalk vorangetrieben wurde.

Die zweite wichtige natürliche Voraussetzung war die *Anreicherung des Hornsteins* durch die Verwitterung der Malmkalke. Auf diese Weise entstanden gleich zwei positive Aspekte für den Bergbau. Der Hornstein wurde stark angereichert, und die Schichten in denen dies geschah, waren leicht abzubauen, denn man musste ja nur Sand und Kies (sowie Ton) abgraben. In Arnhofen war es also nicht nur etwas problematisch, den Abbau in den z. T. schon stark verwitterten und deshalb nicht mehr massiven Kalk voranzutreiben, es war auch gar nicht nötig.

Der Abbau wurde, wie schon angedeutet, auch durch die Beschaffenheit der das Flöz *überdeckenden Schichten* erleichtert. Sowohl die Altabensschotter als auch die Süßwassermolassesande können ohne vorheriges Lockern einfach abgegraben und gefördert werden. Bei vielen anderen bekannten Silexgewinnungsstellen mussten sich neolithische Bergleute mit hartem Felsgestein auseinandersetzen. In Arnhofen war nur Sand und Kies 'beiseitezuschaufeln'. Die Art der Deckschichten wirft die Frage nach technischen Problemen durch instabile Schachtwände und -münder auf.

Zunächst ist ein genauerer Blick auf die Beschaffenheit der beiden *Deckschichten aus Lockergestein* zu werfen.

Die *Sande* der sogenannten Oberen Süßwassermolasse sind der geologischen Stufe des unteren bis mittleren Sarmat am Beginn des Obermiozän zuzuordnen (GRÜNDER 2003, 21 Abb. 17 und 25). Im Bereich der ausgegrabenen Bergwerksflächen betrug ihre Mächtigkeit bis zu 5 m, südlich und östlich des Bergwerksrandes sind bei anderen Aufschlüssen Mächtigkeiten über 10 m anzutreffen.

Es handelt sich um stark mittelsandige Feinsande aus Quarzkörnern von gelbweißer bis silbergrauer Farbe. Feldspate und Glimmerpartikel treten selten bis gar nicht auf. Rostrote Farbphänomene und Verbraunungen sind auf oxidiertes Eisen zurückzuführen. Die Sande enthalten jeweils ca. 4 % Schluff und Ton (a. a. O., 71ff.). Der Wassergehalt beträgt 8 %. Die Wasserdurchlässigkeit bewegt sich im mittleren Bereich und ist als “durchlässig“ zu klassifizieren (0,04 bis 0,08 mm/s). Die Lagerungsdichte der Sande ist mit einem Wert von knapp 0,54 als dicht anzusehen. Das bei der Sedimentbeschreibung aufgrund seiner Volumenanteile unter 5 % gar nicht berücksichtigte Feinkornmaterial aus Ton und Schluff ist für eine – im Vergleich zu anderen Sanden – überraschend hohe Standfestigkeit verantwortlich (a. a. O., 81 und 94).

In Kombination mit dem Wassergehalt führt die Zusammensetzung der Sande zu einem für den Bergbau positiven Effekt. Sie weisen gegenüber anderen mittelsandigen Feinsanden eine besonders erhöhte Standfestigkeit auf, die auf das Phänomen der sogenannten “scheinbaren Kohäsion“ zurückgeht (a. a. O., 125f.). Bei regenbedingten Wassereinbrüchen oder bei Austrocknung der Sande verliert sich dieser Effekt jedoch und die Standfestigkeit geht stark zurück.

Die *archäologische Folgerung* aus all diesen geologischen Beobachtungen lautet daher: Für den jungsteinzeitlichen Bergbau in Arnhofen waren die niederschlagsärmeren und trockenen, aber nicht zu warmen Phasen des Jahres die ideale Zeit. Da in Frostperioden überhaupt kein flüssiger Niederschlag auftritt und Austrocknungen nur sehr langsam voranschreiten, waren rein theoretisch diese Phasen für den Bergbau besonders günstig. Dazu passt auch der indirekte Nachweis von obertägigen Wirtschaftsfeuern durch das Auftreten verbrannter Hornsteinartefakte in den Haldenschichten (vgl. u. 2.3.). Man kann demnach annehmen, dass zumindest ein Teil des Bergbaus während frostiger Winterphasen erfolgte.

Bei einem natürlichen Schichtverband folgen auf die miozänen Sande zumeist *quartäre Schotter*, die sog. Altabensschotter. Sie sind Reste von Terrassen der Altabens, die im mittleren bis jüngeren Mittelpleistozän abgelagert wurden (GRÜNDER 2003, 26f. und 71). Auf den ausgegrabenen Bergwerksflächen betrug ihre Mächtigkeit bis 4 m. In anderen Bereichen der Arnhofener Senke schwanken die Mächtigkeiten zwischen 3 m und 6,5 m.

Die Schotter bestehen aus mittelsandigen, schwach feinsandigen und schwach grobsandigen Kiesen. Der Sandanteil kann dabei so hoch sein, dass die Schotter auch als “Kies und Sand“ eingestuft werden können. Sand tritt dabei sowohl als Nebengemengeteil auf, als auch konzentriert in linsenförmigen Partien. In den Schottern treten rostbraune und schwarze Verfärbungen auf, die Mineralausfällungen von Eisenoxiden und Mangan darstellen. Der Wassergehalt der Schotter schwankt zwischen 5 % und 10 %. Die Wasserdurchlässigkeit liegt ebenfalls im mittleren Bereich (“durchlässig“).

Dabei ist sie etwa zehnmal höher als die der miozänen Sande (0,4 bis 0,8 mm/s). Die Lagerungsdichte ist dagegen mit einem Wert 0,39 nur mitteldicht (a. a. O., 75). Der Feinkorngehalt erreicht 2 %. Die Mineralausfällungen führen dazu, dass auch die Schotter gegenüber den üblichen Erwartungswerten für vergleichbares Sediment eine leicht erhöhte Standfestigkeit besitzen.

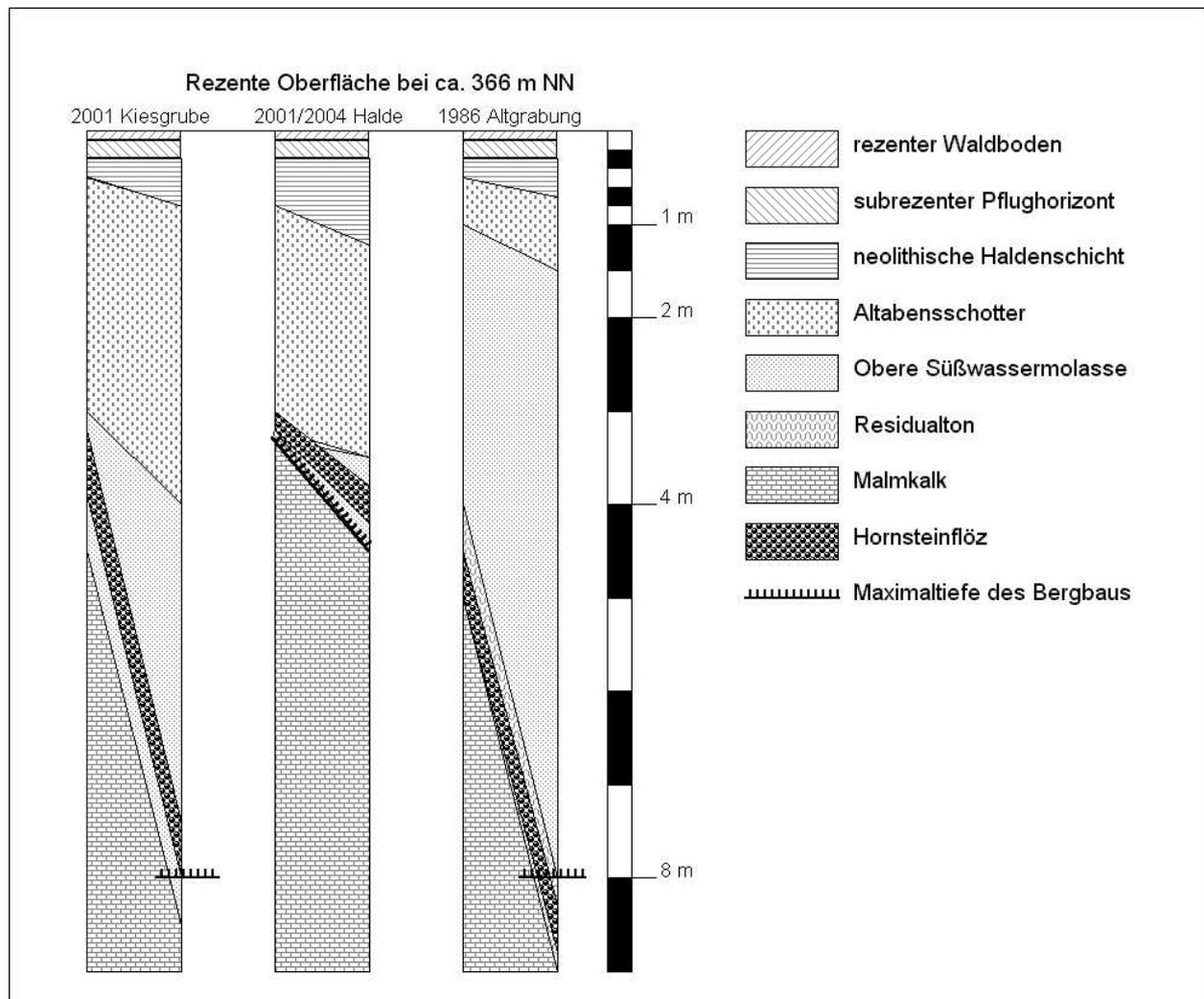


Abb. 1.9: Abensberg-Arnhofen. Schematische geologische Schichtenfolgen für die verschiedenen Grabungsbereiche innerhalb des Bergwerks. Diagonal verlaufende Schichtgrenzen verdeutlichen die Schwankungsbereiche im jeweiligen Grabungsabschnitt (nach BINSTEINER 1990 und GRÜNDER 2003; Geologie 2004: RIND 2004; zum räumlichen Bezug vgl. u. 2.1. Abb. 2.1).

Die *Mächtigkeit dieser Schichten* variierte in den bisher ausgegrabenen Bereichen stark (**Abb. 1.9**). Zwei Schichten konnten sogar gelegentlich aussetzen. So ist der Residualton in den neuen Grabungen bisher nicht angetroffen worden. Im Bereich der Haldengrabung liegt der Schotter sogar manchmal auf dem Kalk auf oder er wird nur von einer dünnen Decke aus Relikten der Molasse davon getrennt. Ohne Trennschicht sitzt der Schotter in der 2001 beobachteten Kiesgrube auf dem Kalk auf.

Das Hornsteinflöz besteht dann aus einer stark mit Ton angereicherten Süßwassermolasseschicht von wenigen Dezimetern Dicke. Manchmal fehlt die Molasse auch ganz (vgl. o.), und der Hornstein ist unmittelbar am Fuß der Schotter eingelagert.

Beide Deckschichten besitzen nach den ingenieurgeologischen Untersuchungen von Gründer zwar eine *Standfestigkeit*, die höher ist, als man sie bei Sedimenten dieser Art gewöhnlicherweise erwarten würde. Aber reicht das aus, um ohne Schachtverbau einen gefahrlosen Bergbau zu ermöglichen?

Die naturwissenschaftliche Antwort ist eindeutig und lautet *'nein'*. Gründer kommt nämlich zu dem Schluss, "Berechnet man die Standsicherheit für die Böschung mit Hohlraum [also für einen Duckelbau mit Weitung; Anm. d. Verf.] bei ungünstigen Bodenkennwerten [...], so ist eine Standsicherheit *nicht* gewährleistet"(ders. 2003, 104; meine Hervorhebung). Böschungen, deren Standsicherheitskennwerte zwischen 1,0 und 1,4 schwanken, gelten in der Ingenieurgeologie als labil (a. a. O., 104f. und 124ff.). Stabil wäre eine Böschung erst bei einem Wert von über 1,4. Der von Gründer errechnete Wert für die Standsicherheit eines Schachtes, der in den miozänen Sanden Weitungen besitzt, beläuft sich auf nur 1,08. Eine senkrechte Schachtwand in den pleistozänen Schottern kommt ebenfalls nur auf 1,24. Die Wände der Schächte befanden sich nach Gründer in einem labilen Zustand, d.h. es konnte jederzeit zu spontanen Abplatzungen von Teilen der Wände kommen. So wurden auch die geologischen Profile von Gründer aus Sicherheitsgründen stets in einem Winkel von 75° angelegt (a. a. O., 35).

Die Ergebnisse Gründers können also nicht als Beleg für einen Bergbau ohne Schachtverbau, also ohne Abstützung der Schachtwände, herangezogen werden (vgl. RIND 2004, 60). Nur weil die Deckschichten eine Standfestigkeit besitzen, die relativ höher ist als bei gleichartigen Sedimenten, heißt das nicht, dass die absoluten Standfestigkeitswerte für einen gefahrlosen Bergbau ausreich(t)en! Technisch gesehen sind die Schachtwände in beiden Deckschichten labil. Die Resultate machen damit wahrscheinlich, dass die Schächte abgestützt gewesen sein *müssen*. Bei den hier untersuchten Ausgrabungen fanden sich insgesamt nur drei ineinander verstürzte Schächte (s. u. 2.1.2. Abb. 2.7). Bei über 200 Schächten hätte die Zahl der Einstürze viel höher sein müssen, wenn die Schächte ohne Verbau angelegt worden wären. Bis zum Jahr 2003 fand sich aber nur ein einziger Schacht (RIND 2004, 60), bei dem die Bergleute den Vortrieb eingestellt hatten. Die bei labilem Gefüge häufig auftretenden Abplatzungen – etwa aus Schottern – hätten Bergleute in tieferen Schächten verletzen oder sogar verschütten können. Es wurde aber kein einziger derartiger Befund ausgegraben.

In Zusammenhang mit den technischen Kennwerten der Deckschichten zeigen Überlegungen zum Ablauf des Bergbaus, dass dieser schon rein theoretisch ohne *Schachtabstützungen* nicht denkbar ist. Die Befahrung der Schächte erfolgte höchstwahrscheinlich mittels Seilfahrt. Für Steigbäume oder Leitern war einem durchschnittlichen Schachtdurchmesser von knapp 1 m kein Platz. So betrug etwa der Maximaldurchmesser von 136 Schächten auf Planum 4 nur 1,01 m. Bei labilen Schachtwänden wäre jede Art der Befahrung kompliziert und gefährlich geworden, weil man ein ständiges Anstoßen an den Wänden und darauf folgende Abplatzungen nicht verhindern konnte. Ganz zu schweigen von den ständigen Beschädigungen der Wände, die bei einer anzunehmenden Seilförderung durch zufälliges Anschlagen des Förderkorbes aufgetreten wären. *Sowohl nach den ingenieurgeologischen Erkenntnissen von Stefan Gründer als auch nach praktischen Überlegungen zum Ablauf des Bergbaus ist in Arnhofen ein Schachtbau ohne Abstützungen unvorstellbar.*

Neben der Geologie des tieferen Untergrundes ist auch die der oberflächennahen Bereiche, die *Bodenkunde*, von Bedeutung für die Archäologie. Auch hier sind neue pedologische Erkenntnisse vorzustellen. Das Areal des Bergwerkes mit seiner ehemals von Pingen und Halden geprägten Oberfläche ist, wie gesagt, heute weitestgehend verebnet. Diese Verebnung geht wahrscheinlich auf die Beackerung in der Neuzeit zurück, die den in fast allen Profilen auftretenden subrezentem Pflughorizont erzeugte. Vermutlich lagen bis zum frühen 19. Jh. weite Teile der Bergwerksfläche unter dem Pflug. Die heutige Bewaldung ist zumeist späteren Datums.

Bereits die Topographie mit ihrer geringen Reliefenergie ließ vermuten, dass es in der Senke östlich von Arnhofen kaum zu Erosion kam (VÖLKEL/LEOPOLD 2001). Da die Sande und Kiese des Untergrundes zudem Wasser sehr schnell nach unten abführen, tritt zur geringen Reliefenergie auch eine geringe Erodibilität des Untergrundes.

Die Analyse eines *Bodenprofils* direkt südlich außerhalb des Bergwerkes ergab denn auch, dass hier die ursprüngliche Geländeoberfläche beinahe vollständig erhalten war. Das Fehlen einer etwa 10 cm mächtigen Humusauflage ist nach Völkel und Leopold für eine Geländerekonstruktion vernachlässigbar (ebd.). Aus dem Gutachten geht nicht hervor, welchen Bodentyp der jungsteinzeitliche Bergbau antraf.

Nach dem Ende des Bergbaus erfolgte jedenfalls eine Wiederbewaldung der Haldenlandschaft (LEOPOLD/VÖLKEL 2003, 58f.), die solange andauerte, dass eine Bänderparabraunerde entstehen konnte. Wie seine unmittelbare Umgebung war also auch der Bereich des Bergwerkes nicht von Erosion betroffen, da sich ein solcher Boden nur entwickeln kann, wenn die Bodenbildungsprozesse längere Zeit nicht gestört werden.

Bei einer Parabraunerde entsteht ein charakteristisch lessivierter A-Horizont (Al). Tonanteile und (färbende) Bodenminerale werden dabei in einen tieferen Horizont (Bt) verlagert. Der Al-Horizont wird dadurch durchgehend gebleicht.

Archäologisch bedeutet dies, man stößt beim Ausgraben unter dem subrezentem Pflughorizont auf einen farblich weitgehend homogenen Horizont, wobei die leichten Farbunterschiede keine anthropogenen Schichten anzeigen (LEOPOLD/VÖLKELE 2003, 59). Diese Veränderung reicht bis in eine Tiefe von 0,6 m und damit weit in die ungestörten Haldenschichten hinein (s. u. 2.2.). Sie betrifft unterschiedliche archäologische Haldenschichten in gleicher Weise. Bei den Ausgrabungen erschwerte sie das Erkennen von Schicht- und Befundgrenzen bis in eine Tiefe von etwa 60 cm unter der heutigen Geländeoberkante (vgl. u. 2.2.).

Die *Funderhaltung* kann man mit den Ergebnissen der Geologie und der Bodenkunde erklären. Das Bodenmilieu ist kleinräumig unterschiedlich. Bereiche mit mittel bis stark sauren Abschnitten liegen neben solchen mit auffällig niedrigeren Ph-Werten. Die Wasserdurchlässigkeit der Oberbodenschichten dürfte zusammen mit der geologischen Deckschichten und des Jurakalkes darunter dazu geführt haben, dass der Untergrund – und damit auch die Schachtverfüllungen – eine häufig wechselnde Feuchtigkeit aufwies. Beide Phänomene, wechselnde Durchfeuchtung ebenso wie unterschiedliche Säuremilieus, wirken sich negativ auf die Erhaltung von Funden aus organischem Material aus. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass Funde aus Holz, Knochen, Geweih, Leder oder Pflanzenresten in den Haldenschichten und Schachtverfüllungen weitestgehend fehlen. Nur in den etwas tonreicheren Schichten nahe der Schachtsohlen fanden sich in den letzten Jahren vermehrt Geweihartefakte (frdl. mdl. Mitt. PD Dr. Michael-Maria Rind).

Zwei *Fundkomplexe aus organischem Material* sind dabei hervorzuheben. Nach Beendigung der Projektgrabungen wurden an der Sohle des Schachtes Nr. 389 mehrere Geweihfragmente gefunden (RIND 2004, Taf. 2,5), von denen eines nach der Abbildung zu urteilen ein Werkzeug zur Silexbearbeitung, einen sog. Punch, darstellt (vgl. EISELE et al. 2003, 51 Abb. 21). Dieses dürfte beim Verfüllen des Schachtes an seinen Fundort gelangt sein, denn eine Silexbearbeitung an der Schachtsohle war sonst nirgends zu belegen. Abgesehen davon fehlt auch hier der Platz.

Der andere Fund ist besonders in Hinsicht auf die oben diskutierte Frage nach der *Abstützung der Schächte* interessant (**Abb. 1.10**). Es handelt sich um Fragmente von ursprünglich wohl zwei Gegenständen aus organischem Material, die bis heute (Stand 10/2009) nicht wissenschaftlich bearbeitet sind. Sie wurden im August 2001 wenige Dezimeter über der Sohle des Schachtes Nr. 90 in etwa 6 m Tiefe angetroffen.



Abb.1.10: Arnhofen.
Detailfoto eines Profils durch die Ostwand von Schacht Nr. 90 nahe seiner Sohle.
Darin steckt senkrecht ein Fundstück aus dunklem organischem Material (Ast, Rinde oder Geflecht?).

Aufgrund ihrer Fragilität konnte nur eines der Stücke geborgen werden. Es steckte senkrecht an der Ostwand des Schachtes unmittelbar zwischen dem Anstehendem und der Verfüllung. Der Ausgräber Klaus Eisele beschrieb dieses Stück als schlauchförmiges, unten spitz zulaufendes und geschlossenes hohles Objekt, dessen Mantel aus Rinde oder einem Pflanzenfasergeflecht bestehen könnte. Bis heute (12/2007) ist unklar, um was es sich bei diesem Fund handelt. Ob er die Reste eines Förderkorbes, die Fragmente einer Matte oder eines Astes zur Stabilisierung der Schachtwand oder etwas anderes darstellt, bleibt vorerst Spekulation.

Nach diesen einleitenden Abschnitten ist das folgende Kapitel der Untersuchung der Bergbauorganisation auf dem jungsteinzeitlichen Bergwerk von Abensberg-Arnhofen gewidmet.

“Hinter der Hacke ist es dunkel.“

(deutsches Bergmannssprichwort; zit. in FELDER et al. 1998, 37)

2. Untersuchungen zum neolithischen Bergbau in Arnhofen

Das erste Hauptkapitel dieser Studie widmet sich der Untersuchung der Hornsteingewinnung. Im Zentrum steht dabei die Frage, ob es eine Organisation des Abbaus gab, und wenn ja, wie diese Organisation aussah. Es handelt sich hier vornehmlich um eine wirtschaftshistorische Fragestellung. Dazu gehören auch Aussagen zur Größe von Arbeitsgruppen, dem Arbeitsumfang, der Förderleistung und dergleichen. Es geht also nicht in erster Linie um die Technik des Schachtbaus sondern um die räumliche Struktur anthropogener und geologischer Befunde.

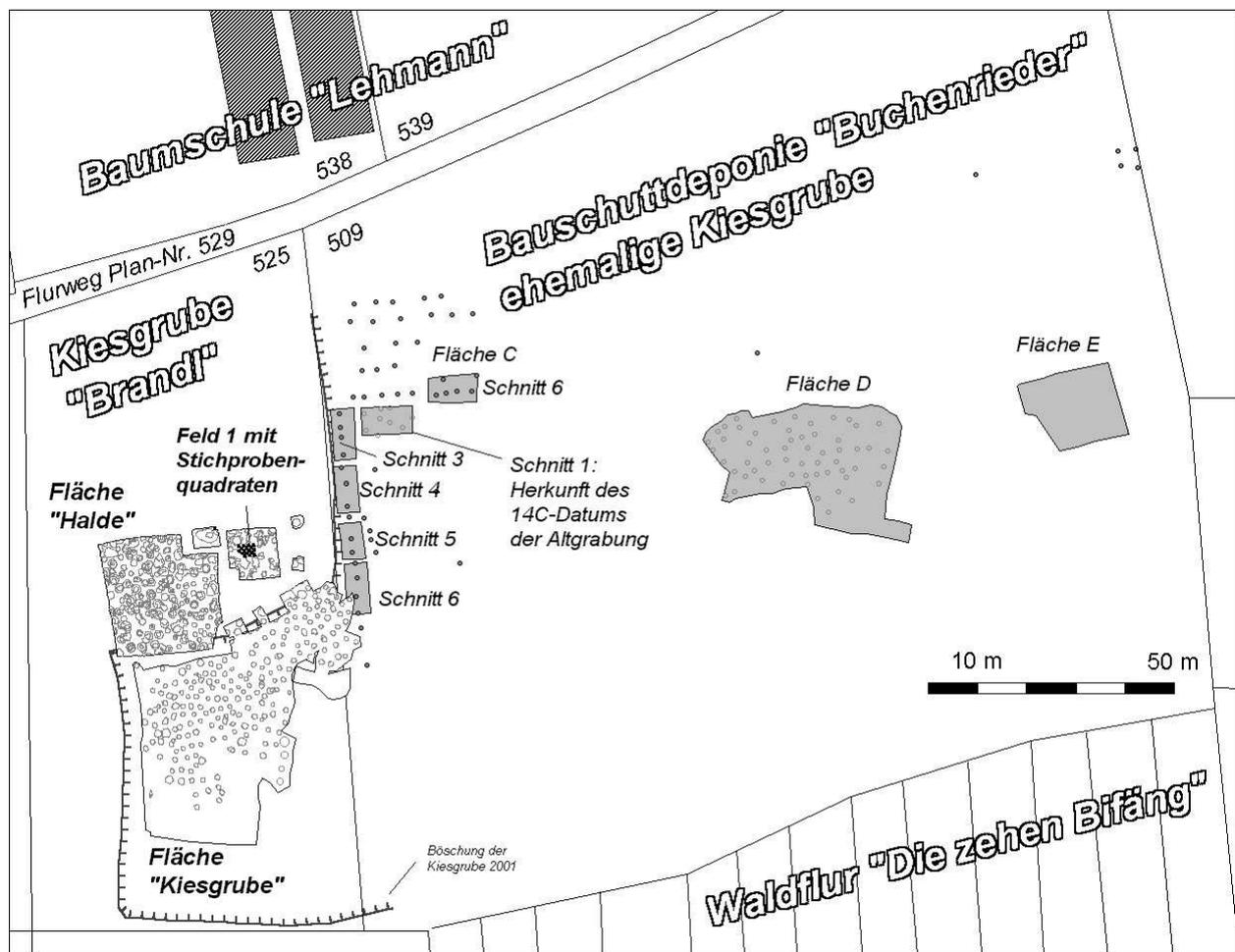


Abb. 2.1: Abensberg-Arnhofen. Ausschnitt der Flurkarte mit Lage der Grabungsschnitte.

Die Altgrabung (hellgraue Flächen und Punkte; BINSTEINER 1990, Beil.2 nachdigitalisiert) liegt auf dem Areal der heutigen Bauschuttdeponie “Buchenrieder”. Die Grabungen des DFG-Projektes schlossen westlich auf der seit 1998 betriebenen Kiesgrube “Brandl” an (Kartengrundlage: “Flurkarte” Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Ausschnitte der digitalen Flurpläne NO 34/10 und 33/10).

Im Einzelnen werden dafür drei Aspekte untersucht (**Abb. 2.1**): die Verteilung der Schächte auf den Grabungsflächen “Halde“ und “Kiesgrube“ (2.1.), die Fundverteilung in den oberen Schichten der Halde im Bereich von Feld 1 (2.2.) und die Rohmaterialverteilung im Untergrund (2.3.). Für diese Untersuchung wurde ein quantitativer Ansatz gewählt, um dem enormen Datenpotential gerecht werden zu können, welches mit den Ausgrabungen geschaffen wurde. Will man räumliche Daten quantitativ untersuchen, empfiehlt sich eine computergestützte Vorgehensweise, wobei naturgemäß geographisch-statistische Methoden im Zentrum stehen.

Für diese Arbeitsweise mussten daher kaum einzelne Befunde näher betrachtet werden. Der Aufwand, den eine Einzelauswertung von über 400 Schächten bedeuten würde, steht zudem in keinerlei Verhältnis zum damit – im Sinne der Fragestellung – erzielbaren Erkenntniszugewinn. Daher konnte auch auf einen Befundkatalog verzichtet werden. Schließlich besteht die Gefahr, angesichts einer Fülle von Einzel- und Detailinformationen das Ziel einer Abstraktion von eben diesen Informationen aus den Augen zu verlieren. Für eine allgemein formulierte Fragestellung nach Quantitäten ist eine direkte EDV-gestützte Auswertung vielversprechender. Es reicht daher für die hier beabsichtigte Auswertung aus, sich auf die fragestellungsrelevanten Aspekte zu konzentrieren, nämlich die räumlichen Beziehungen der Befunde.

2.1. Schachtverteilung und Organisation des Abbaus

Obwohl die Verteilung der Schächte nur auf Planumsflächen dokumentiert wurde, die bis zu 5 m unter der ehemaligen Oberfläche liegen, lassen sie doch Aussagen zur neolithischen Raumnutzung der Bergwerksfläche zu. Dies ist möglich, da die Schächte fast völlig senkrecht in den Untergrund getrieben wurden (vgl. EISELE u.a. 2003a, 48 und Abb. 19). *Mit einem Querschnitt in mehreren Metern Tiefe ist somit zugleich eine beinahe exakte Lokalisierung der Schachtmünder an der Oberfläche gegeben.* Eine Untersuchung von Verteilungsmustern auf den Planumsflächen kann daher als gute Approximation an die räumliche Situation gelten, die sich den neolithischen Nutzern des Bergwerks bei der Planung ihres Vorgehens präsentierte. Lässt die Verteilung der Schächte regelhafte Aspekte erkennen, können diese Resultate mit plausiblen Modellen zur Bergwerksnutzung verbunden werden. Diese Modelle beinhalten zugleich Antworten auf die oben aufgeworfenen Fragen.

Der folgende Abschnitt zeigt zunächst, wie aus der Verbindung vieler Einzelplana ein idealisierter Gesamtplan der Grabungen erstellt wurde (2.1.1.). Es folgt eine Diskussion der Chronologie des Bergbaus unter dem Aspekt möglicher Verbindungen des Plans mit der Raumnutzung (2.1.2.).

Einer Anwendung erster geographisch-statistischer Untersuchungsmethoden auf den Gesamtplan (2.1.3.) schließt sich ein Abschnitt an (2.1.4.), in dem die Daten z. T. mit statistischen Methoden analysiert werden, die erstmals in der Montanarchäologie zum Einsatz kommen. Danach geht es um die Entwicklung theoretischer Kriterien, die zu einem Modell für die Genese der räumlichen Strukturen überleiten (2.1.5.). Schließlich werden die dabei entwickelten Maßgaben für die beiden ausgewerteten Teilpläne im Bereich der Kiesgrube (2.1.6.) und der Halde (2.1.7.) umgesetzt. Das Teilkapitel schließt mit einem Vergleich der Organisationsstrukturen von Arnhofen mit denen anderer neolithischer Bergwerke (2.1.8.).

2.1.1. Planerstellung

Die Datengrundlage der Untersuchung in diesem Abschnitt bilden die Schachtumrisse in Plana, die oberhalb des Flözniveaus und damit auch oberhalb der Schachtweitungen angelegt wurden (**Abb. 2.2.**). Würde man die Planumsumrisse auf dem Niveau der Weitungen verwenden, ließen sich die zur räumlichen Untersuchung wichtigen Schachtmittelpunkte ungleich schwerer lokalisieren. Da alle Befundumrisse auf der Grabung tachymetrisch eingemessen wurden, standen sie bereits in einem Dokumentationsformat zur Verfügung, das eine problemlose Weiterverarbeitung in der EDV erlaubt.

Mit den Ausgrabungen des Projektes wurden in zwei eng benachbarten aber nicht verbundenen Bereichen der Plan-Nr. 525 (Osthälfte) die bisher größten zusammenhängenden Flächen mit Schachtbau in Abensberg-Arnhofen grabungstechnisch dokumentiert. Eine Fläche umfasste die Sohle der Kiesgrube in der südlichen Grundstückshälfte. Hier war durch fortgeschrittenen Kiesabbau bereits zu Beginn der Projektgrabungen eine Kiesabbaugrube entstanden, deren Boden zwischen 3 m und 7 m unter der natürlichen Oberfläche lag. Mit der anderen Grabungsfläche wurde von der heutigen Oberfläche aus die Bergwerkshalde befundorientiert ausgegraben. Besonders im Bereich der Kiesgrube fiel dabei die Regelmäßigkeit der Schachtverteilung ins Auge, weshalb ihre geographisch-statistische Auswertung angezeigt erschien.

Die Arbeitsgrundlage für quantitative Methoden sollte aus möglichst großen, zusammenhängenden Flächen bestehen. Im Bereich der *Kiesgrube* war dazu ein komplizierteres Vorgehen nötig. Hier gingen Befunde, die auf verschiedenen Plana in unterschiedlichen Niveaus zwischen 2 m und 4,5 m unterhalb der heutigen Oberfläche erfasst wurden, in den idealisierten Gesamtplan ein (**Abb. 2.3**). Am westlichen und nördlichen Rand der Kiesgrube beeinflusste das Verhältnis zwischen den großflächigen Plana 3 (ca. 3,2 m Tiefe) und 4 (ca. 4,5 m Tiefe) die Bildung des Planes^{2.1}. Auf dem Planum 3 war es schwierig, mit Kies verfüllte Schächte zu identifizieren. Einige wurden, wie sich bei der Anlage des Planums 4 zeigte, übersehen. Das Planum 3 musste noch im März 2000 allein mit Mitteln der Kreisarchäologie untersucht werden. Innerhalb weniger Tage wurden hier Schächte in Notgrabungen dokumentiert, die dem Kiesabbau unmittelbar vorangingen bzw. ihn begleiteten.

^{2.1} In der Kiesgrube gibt es keine digital dokumentierten Plana mit den Nummern 1 und 2. Die Numerierung der digital eingemessenen Plana beginnt bei 3, weil zwei kleinflächige Arbeitsplana aus den Notgrabungen 1998, die hier nicht bearbeitet werden, die Nummern 1 und 2 tragen.

Bei Problemfällen war keine Zeit für genauere Untersuchungen vorhanden. Die exakte Lage der auf diesem Planum dokumentierten Schächte konnte auch von leichten Messproblemen beeinflusst sein.



Abb.2.2: Abensberg-Arnhofen. Blick von Süden im August 2001 auf die aktuellen und abgearbeiteten Plana an der Sohle der Kiesgrube.

Auf halber Höhe des Bildes liegt die Nordböschung der Kiesgrube, in deren östlichen Teil die Profilstufen erkennbar sind (oben rechts). Das Planum 2 der befundorientierten Haldengrabung ist aus dem Blickwinkel der Kamera nicht sichtbar, da es hinter den Abraumhügeln an der Nordwestböschung der Kiesgrube (blauer Pfeil oben links) verborgen liegt. Die Textunterstreichungen geben das ungefähre Niveau des jeweiligen Planums an, aus der Sicht der Kamera gesehen (zur Position der Kamera s. u. Abb. 2.3).

Auf dem Planum 4 kamen daher einige Befunde im schon vom Planum 3 abgedeckten Bereich hinzu. Sie waren dort einfach noch nicht erkannt worden. Diese Aspekte machen sich besonders im nördlichen und westlichen Randbereich der untersuchten Flächen bemerkbar.

Planum 3 konnte noch eine größere Fläche erfassen als Planum 4, da bei gleichbleibendem Winkel der Kiesgrubenböschung die an ihrem Fuße liegenden Grabungsgrenzen für das Planum 4 nach innen eingerückt werden mussten. Im Randbereich von Planum 3 lagen Befunde, die später also nicht mehr zu überprüfen waren. Ein solcher Bereich mit einer beinahe völligen Befundleere befindet sich am Nordwestrand dieser Fläche. Er wird nicht in den Gesamtplan einbezogen, da eine solche Situation in unmittelbarer Nachbarschaft der hohen Schachtdichten, die später nahebei im Planum 4 dokumentiert wurden, nicht plausibel erscheint (**Abb. 2.3:** grün umrandete Fläche im NW der Kiesgrube).

Ebenso wurden die im Herbst 2000 auf der schiefen Ebene der Böschung des Planums 4 provisorisch eingemessenen Befunde nicht aufgenommen, da hier mit zu großen Verzerrungen zu rechnen ist. Bei Befunden, die auf beiden Plana vermessen wurden, wurde stets der Umriss im Planum 4 als der besser dokumentierte verwendet. Auf den Teilplana des Planums 5 konnten problemlos alle Befunde des vorhergehenden Planums wiedergefunden werden. Es fanden sich innerhalb der untersuchten Fläche keine neuen Schächte mehr. Auch in diesem Fall wurde aus Gründen der Einheitlichkeit auf die Dokumentation des Planums 4 zurückgegriffen, soweit sich die Flächen beider Plana überschneiden.

Am nordöstlichen Rand der Kiesgrube wurden während des Sommers 2001 drei *Nischen* in die ehemalige Böschung des Planums 4 gegraben, um in Stufen Schachtgesamtprofile anzulegen. Auf der Sohle dieser Profilschnitte in etwa 2 m Tiefe wurden ebenfalls kleinflächige Plana aufgenommen. Kurz vor Abschluss der Projektgrabung konnte am Fuße der Profilstufen eine Fläche geöffnet werden, die sich ungefähr auf dem Niveau des Planums 4 befand und den Anschluss der Plana aus den Nischen an die Flächen der Plana 3 und 4 ermöglichte.

Auch die Ausgrabungen des Projektes wurden begleitend zum fortschreitenden Kiesabbau durchgeführt. Dabei ergab, sich wie schon während der Rettungsgrabungen im März 2000, die Möglichkeit für weitere *kleinflächige Plana*. Sie lagen an der Ostseite der Kiesgrube in teils gleichem, teils tieferem Niveau wie die jeweilige Abbausohle der Kiesgrube. Hierbei wurden weitere Schächte dokumentiert. Diese kleinen Untersuchungsflächen konnten mehr oder weniger gut an die Hauptflächen angeschlossen werden. Die dortigen Schächte wurden nur in den Plan aufgenommen, wenn sichergestellt werden konnte, dass in den teilweise undokumentierten schmalen Streifen zwischen der Hauptfläche und den kleinflächigen Plana nicht mit Befunden zu rechnen war. Im anderen Fall gingen sie nicht in den Gesamtplan ein.

Wenn auf diese Weise allerdings nur jeweils einzelne Befunde an den Plan angeschlossen werden konnten, wurde auf ihre Aufnahme verzichtet, da einzelne Objekte, die an drei Seiten von Untersuchungsgrenzen umgeben sind, keine sinnvolle Auswertung bei der Triangulation ermöglichen (**Abb. 2.3**: grün umrandete Fläche am Ostrand der Kiesgrube).

Entlang des gesamten Südteils der Ostgrenze wurden acht Befunde aufgenommen, die bereits 1998 bei vorbereitenden Untersuchungen bzw. bei Notbergungen parallel zum Kiesabbau erfasst wurden. Diese Schächte bildeten bis auf eine Ausnahme den Ostrand der späteren südlichen Untersuchungsfläche. Sie wurden vor Einführung der digitalen Planaufnahme manuell eingemessen. Ihre Lage auf dem Plan ist daher von leichten Ungenauigkeiten beeinflusst.

Insgesamt konnten mit diesen verschiedenen Vorgaben noch weitere ca. 300 m² mit über 40 Schächten an die großflächigen Plana auf der Kiesgrubensohle angeschlossen werden. Die Abgrenzung zwischen nahe beieinanderliegenden oder sich überschneidenden Schächten war dort in der Regel problemlos möglich. Alles in allem wurden auf diese Weise in der Kiesgrube 227 Befunde in einer Untersuchungsfläche von 1 314,5 m² für die Auswertung erfasst.

Im Nordwesten, in der *befundorientierten Haldengrabung*, diente das sog. Planum 2 als Arbeitsgrundlage. Es lag durchschnittlich etwa 1,1 m unter der heutigen Grasnarbe und stellte das insgesamt vierte Planum (1a bis 1c und 2) in diesem Bereich dar. Um das Planum herum waren auf allen Seiten keine weiteren anschließbaren Flächen vorhanden. Die Grabungsgrenze des Planums 2 bildet somit zugleich die Untersuchungsgrenze dieses Teilbereiches. Wegen der unsicheren Befundsituation (vgl. u. 2.2.) und den zu großen undokumentierten Trennstreifen konnten weder die fundorientierte Haldengrabung „Feld 1“ noch die danebenliegende Sonderfläche und die „Feuerstellen“ an eine der beiden Untersuchungsflächen angeschlossen werden.

Aber auch auf dem Planum 2 war die Befundsituation manchmal problematisch, da das Planum z. T. immer noch im Niveau der Haldenschichten lag. In einigen Fällen war nicht eindeutig zu klären, welche der identifizierten und auf dem Planum dokumentierten Schichtgrenzen einem Schacht angehören bzw. welche seinen Umriss am besten wiedergeben. So wurden beispielsweise im Nordost- und im Südwestbereich des Planums Befunde, die eine gemeinsame Außengrenze aber keine oder nur unklare Binnengrenzen besaßen, trotzdem in mehrere Objekte untergliedert, wenn der Umriss des Gesamtobjekts nahelegte, dass hier mehrere kreisförmige Objekte nahe beieinanderlagen. In anderen Fällen wurden nur die kreisförmigen Binnenstrukturen eines Befundes als beste Annäherung an die Lokalisierung des eigentlichen Schachtes betrachtet.

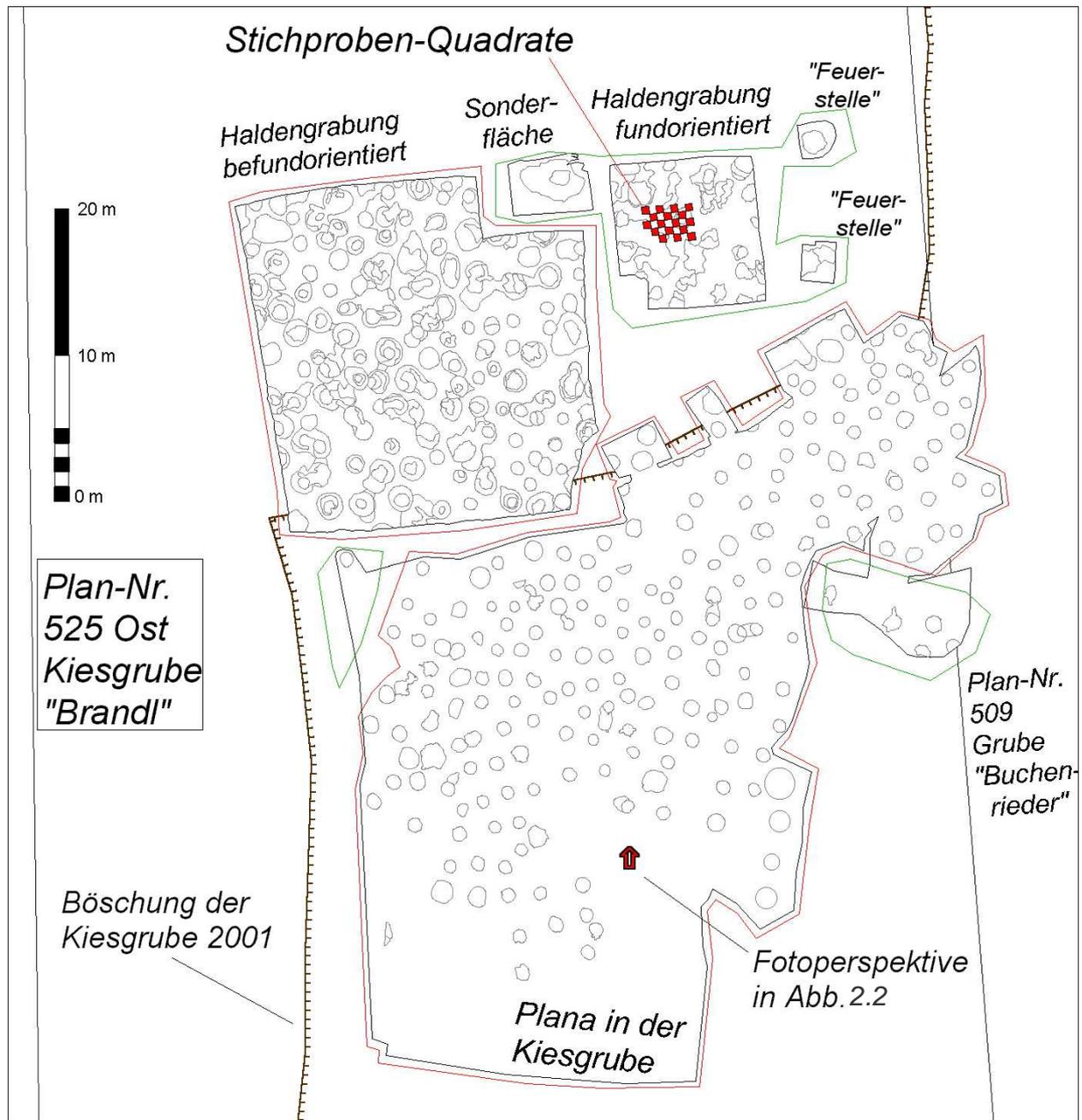


Abb. 2.3: Abensberg-Arnhofen. Idealisierter Gesamtplan für die Teilbereiche Kiesgrube (unten) und Haldengrabung (oben).

Die rot umrandeten Flächen wurden alle auf irgendeinem Niveau durch Plana zusammenhängend so dokumentiert, dass kein Befund übersehen werden konnte. Bereiche, bei denen der Anschluss an die besser dokumentierten Flächen unklar ist, wurden ausgeschlossen (grün umrandet). Die Ausgrabung der hier nicht bearbeiteten Sonderfläche umfasste eine einzige Silexkonzentration und wurde erst nach dem Ende der Projektgrabungen abgeschlossen (EISELE et al. 2003a). Die beiden "Feuerstellen" sind zwei Schachtmünder, die mit holzkohle-reichem Sediment verfüllt wurden (s. u. 2.1.2. Abb. 2.5.).

Dieses Vorgehen erscheint dadurch gerechtfertigt, dass in der Kiesgrube alle Schächte, die im Bereich des Schachthalses geschnitten wurden, einen annähernd runden Querschnitt besaßen. So wurden insgesamt 153 Objekte auf dem 489,8 m² messenden Planum 2 der befundorientierten Haldengrabung als Schächte angesprochen.

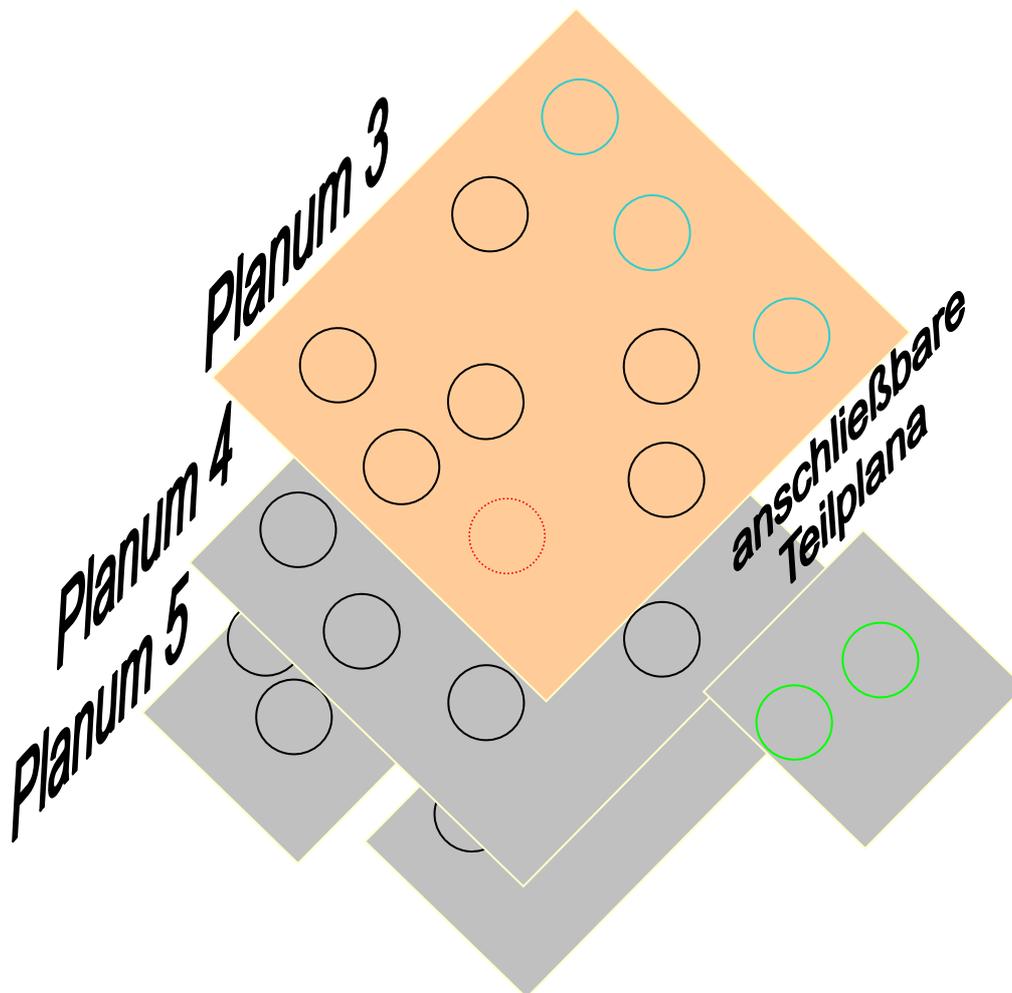


Abb. 2.4: Abensberg-Arnhofen. Schema der Bildung des Gesamtplans für die Kiesgrube.

Auf mehreren Plana erfasste Befunde wurden auf der am besten dokumentierten Fläche aufgenommen – in der Regel Planum 4. Bei Problemfällen (rot gestrichelt) wurde der Befund des am besten dokumentierten Planums verwendet. Befunde, die nur im Planum 3 (blau) oder einem angeschlossenen Teilplanum (grün) erfasst wurden, erscheinen ebenfalls auf dem Gesamtplan.

Anhand einer *schematischen Darstellung* wird das Vorgehen beim Erstellen des idealisierten Gesamtplans im Bereich der Kiesgrube noch einmal verdeutlicht (**Abb. 2.4**). Auf dem Gesamtplan sind demnach Befunde zusammengestellt, die in der Realität niemals gemeinsam nebeneinander auf demselben Planum dokumentiert wurden. Die Grenze der Untersuchungsfläche "Kiesgrube" ist also ein Kompositum aus Teilen der Grabungsgrenzen der Plana 3 und 4 bzw. der angeschlossenen Teilplana.

Der *Gesamtplan* dieses Auswertungsbereiches ist somit streng genommen ein idealisierter Plan. Die von ihm beschriebenen räumlichen Aspekte sind dennoch harte empirische Tatsachen.

Aus Gründen der Einfachheit werden die *beiden Teilflächen* im Folgenden mit den Kurzbezeichnungen angesprochen. Die südliche Fläche auf der Sohle der Kiesgrube wird kurz als „*Kiesgrube*“ bezeichnet. Im Nordwesten der Projektgrabung liegt das Areal der befundorientierten Ausgrabung in der Halde, das hier die Kurzbezeichnung „*Halde*“ erhält. Diese Sprachregelung gilt für das gesamte Teilkapitel 2.1., jedoch nicht darüber hinaus. Mit Formulierungen wie „in der Halde“ bzw. „Kiesgrube“ ist also kein dreidimensionaler Bezug verbunden, gemeint sind im Folgenden stets die beiden getrennten Untersuchungsflächen!

Wenn man in den nächsten Abschnitten die Resultate verschiedener Untersuchungsmethoden betrachtet, sollte man stets die unterschiedliche quellenkritische Problematik bedenken, die mit der Planerstellung verbunden ist. Während im Auswertungsbereich „Halde“ die Identifizierung der Auswertungsobjekte das zentrale Problem darstellte, war im Bereich „Kiesgrube“ die Aussonderung und Eingliederung weiterer Flächen mit Befunden der kritische Aspekt bei der Zusammenstellung der Arbeitsgrundlagen. In der Kiesgrube handelt es sich bei den Befunden sicher um Schächte. Auf der befundorientierten Grabung ist das nicht so sicher. Da es sich aber auch hier um neolithische Bodeneingriffe handelt, können sie genauso gut für die Untersuchung der räumlichen Organisation herangezogen werden. Diese Problematik ist bei allen Auswertungsschritten des Teilkapitels 2.1. zu beachten.

Bei allen Ergebnissen der folgenden Abschnitte ist außerdem zu bedenken, dass beide Untersuchungsflächen ganz oder weitgehend von anderen Bergwerksflächen umschlossen sind. In der Kiesgrube ist nur am Südrand die Grenze des Bergbaus durch das Aussetzen der Schächte erfasst. Nach allen anderen Seiten setzt sich das Bergwerk fort. Die Halde befindet sich schon weiter im Inneren der Bergwerksfläche und wird auf allen Seiten von ebenso dicht mit Schächten belegten Flächen umschlossen.

Durch das bisher beschriebene Vorgehen konnte ein Gesamtplan der Ausgrabungen des DFG-Projektes für die räumlich-quantitative Auswertung erstellt werden. Erste Hinweise auf die Abfolge der Bergbauaktivitäten sollten die naturwissenschaftlichen Datierungen von Schachtverfüllungen liefern – so war zu hoffen. Wie es um diese Hoffnung bestellt ist, beschreibt der nächste Abschnitt.

2.1.2. Chronologie des Bergwerkes

Durch Probenentnahmen während der Ausgrabungen des DFG-Projektes und weiterer Aktivitäten der Kreisarchäologie Kelheim standen 2007 zahlreiche ^{14}C -Daten zur Erforschung der Chronologie des Bergwerkes von Abensberg-Arnhofen zur Verfügung (**Tab. 2.1**).

Nr.	Gruppe	Probennr.	Herkunft	Objektnummer	Planum	BP	6	BC	6
1	6	Hv-14924	BINSTEINER 1990, 48	"Fläche C, Schnitt 1, Pl. 4" entspricht der Halde ca. 1,1 m unter Oberfläche ^{2.2}		5410	60	4221	94
2	6	KN-5336	DFG Projekt	75	3	5400	40	4238	74
3	6	KN-5665	Kreisarchäologie Kelheim	278	Planum 3A	5410	45	4242	72
4	6	KN-5334	DFG Projekt	56	3	5420	45	4254	64
5	5	KN-5666	Kreisarchäologie Kelheim	388	Profil unter Planum 4	5640	70	4473	82
6	5	KN-5662	Kreisarchäologie Kelheim	230	Planum 4b	5675	45	4508	55
7	5	KN-5335	DFG Projekt	62	3	5680	45	4515	56
8	5	KN-5337	DFG Projekt	189/190	3	5665	95	4517	114
9	4	KN-5664	Kreisarchäologie Kelheim	246	Planum 4 auf 4A	5735	50	4586	73
10	4	KN-5331	DFG Projekt	120	3	5755	45	4606	66
11	4	KN-5710	Kreisarchäologie Kelheim	389	unter Planum 4	5762	56	4610	73
12	3	KN-5413	DFG Projekt	16	Profil unter Planum 6, Zone 5 b	5790	40	4637	60
13	3	KN-5663	Kreisarchäologie Kelheim	234	Planum 4A auf 4B	5813	52	4660	73
14	3	KN-5214	DFG Projekt	6	3	5805	55	4651	74
15	3	KN-5711	Kreisarchäologie Kelheim	419	unter Planum 4B	5840	53	4689	77
16	2	KN-5659	Kreisarchäologie Kelheim	115	unter Planum 5	5895	49	4765	56
17	2	KN-5339	DFG Projekt	134	3	5905	60	4776	69
18	2	KN-5414	DFG Projekt	16	Profil unter Planum 6, Abschnitt I	5925	150	4810	191
19	2	KN-5660	Kreisarchäologie Kelheim	183	u. Pl. 5	5945	67	4822	83
20	1	KN-5412	DFG Projekt	34	~ 4	6090	155	5014	194
21	1	KN-5338	DFG Projekt	117	3	6100	250	5002	280
22	1	KN-5415	DFG Projekt	151	Profil unter Pl.4 Abschnitt I	6100	80	5031	133
23	-	KN-5661	Kreisarchäologie Kelheim	209	Profil unter Planum 3	6205	55	5158	87
24	-	KN-5410	DFG Projekt	146	4	6514	45	5461	62
25	-	KN-5411	DFG Projekt	113	4	6705	162	5624	133

Tab. 2.1: ^{14}C -Daten von Holzkohlen aus Schächten und Befunden des Bergwerkes Arnhofen. Die einzelnen Daten sind aufsteigend in der Reihenfolge des ^{14}C -Alters (BP) geordnet. Die Unterteilung durch dicke Zeilentrennstriche orientiert sich an der Gruppierung der Daten (vgl. Text). Kalibriert mit CalPal (Weninger 2000). In der Spalte "Herkunft" ist die Probenherkunft aufgeführt.

^{2.2} Die Position der beprobten Haldenstelle ist nirgends auf einem Plan vermerkt. Es gibt keine genauere Herkunftsangabe als Grabungsschnitt und Planum (Fläche C, Schnitt 1, Planum 4; ENGELHARDT 1990, 48). An anderer Stelle ist das Niveau dieses Planums mit -1,1 m angegeben (BINSTEINER 1990, 16; zur Lage dieses Schnittes s. o. Kapitel 2 Abb. 2.1).

Von den im Laufe des DFG-Projektes in den Jahren 2000 und 2001 genommenen *Holzkohleproben* wurden insgesamt 14 datiert (**Tab. 2.1:** DFG-Projekt). Aus den zwischen 2002 und 2004 durchgeführten Grabungen der Kreisarchäologie Kelheim stammen noch einmal 10 Proben aus Holzkohle, die ebenfalls in die Untersuchung der Nutzungschronologie eingehen (**Tab. 2.1:** Kreisarchäologie). Diese beiden Probengruppen wurden durch das Kölner ^{14}C -Labor datiert und vom Autor mit der Software 'CalPal' kalibriert. Das aus den 80er Jahren stammende ^{14}C -Datum wurde aus Gründen der Vollständigkeit in die Tabelle mit aufgenommen.

Bei allen Proben des DFG-Projektes handelte es sich um *Sammelproben*, d.h. es wurden stets mehrere Holzkohlestückchen aus derselben archäologischen Schicht zu einer Probe vereint. Ob diese jeweils zu einem verbrannten Holzstück gehörten ist unklar. Die Stückchen besaßen eine Größe von wenigen Millimetern bis maximal etwa 2,5 cm. An den datierten Proben wurden bedauerlicherweise vorher keine anthrakologischen Untersuchungen durchgeführt. Allerdings liegen noch weitere unbearbeitete Holzkohleproben mit entsprechend großen Kohlestückchen vor, von denen bisher (10/2010) keine untersucht wurde. Anthrakologische Holzartenbestimmungen wären also vermutlich noch immer möglich. Aus Bodenproben, die nach Abschluss des DFG-Projektes von der Kreisarchäologie genommen wurden, konnte O. Nelle, Regensburg, die Holzkohlen aus drei Schächten als Kiefer bestimmen (RIND 2004, 62). Demnach dürfte in der Jungsteinzeit genauso wie heute auf dem sandigen, trockenen Standort ein von Kiefern dominierter Wald gestockt haben.

Die Holzkohlen des DFG-Projektes stammen alle aus *Verfüllungen von Schächten* und wurden bei Plana- und Profilanlagen in 3,0 m bis etwa 5,5 m Tiefe unter der heutigen Oberfläche entnommen. Nur bei einer DFG-Probe (KN 5412) vom Planum 4 ist die Zuordnung zum Befund etwas unsicher. Sie stammt aus einem Bereich, der außerhalb identifizierter Schachtgrenzen liegt. Da aber nur ca. 20 cm östlich der Schacht Nr. 34 liegt und sich dessen westliche Befundgrenze im Planum 3 sogar nur 10 cm östlich der Probenposition befindet, erscheint eine Zuordnung zu diesem Befund gerechtfertigt. Die Proben der Kreisarchäologie besitzen überwiegend den gleichen archäologischen Kontext. Nur Proben mit Befundnummern größer als 220 stammen aus der befundorientierten Haldengrabung des Nordfeldes aus den Schachtmündern an der Sohle der Halde.

Der Prozess der Schachtverfüllung und die dadurch für die Datierung entstehende Problematik wird in einem der folgenden Abschnitte im Detail erläutert werden (s. u. 2.1.5.). Zum Verständnis sei hier vorgegriffen: Unmittelbar nach der Nutzung wurden die Schächte direkt und bewusst vom Menschen wieder zugefüllt; dazu verwendete man zum Teil den Aushub neuer Schächte, zum Teil Haldenmaterial von der Oberfläche, also von vorhergehenden Aktivitäten.

Bei diesen Aktivitäten konnten alte Holzkohlen von der Oberfläche oder aus den Haldenschichten mit in die Schachtverfüllungen gemischt werden wie der auf Planum 4 beprobte Schacht Nr. 146 zeigt (**Abb. 2.5**). Hier war die beprobte Schicht ebenso wie die anderen in Form eines Halbkreises um ein Zentrum am Nord-Nord-West Rand des Schachtes angelagert. Ein Teil des Kieses und Sandes, der in den Schacht eingefüllt wurde, war spätestens beim Einfüllen mit Holzkohle vermischt worden. Vielleicht lag die Holzkohle zuvor nahe der Oberfläche, vielleicht war sie schon vorher auf irgendeine Weise unter das später verkippte Material gemischt worden.



Abb. 2.5: Abensberg-Arnhofen. Ansicht des Planums 4 von Schacht Nr. 146 (= Befund Nr. D-11 auf Planum 4, vgl. Fototafel im Bild).

Die halbkreisförmige Anordnung der Verfüllungsschichten ist Ergebnis der Anlagerung an einen Schüttkegel, der auf eine Verfüllungsrichtung von Nord-Nord-West hinweist. Auch die Holzkohle führende, beprobte Schicht (orange Linie) folgt diesem Verlauf. Die Holzkohle wird in die älteste LBK datiert (KN 5410: 5461 +/- 62 cal BC; s. o. Tab. 2.1 Nr. 24).

Da bei den Ausgrabungen des DFG-Projektes in keinem Fall eine Holzkohlekonzentration mit Verziegelung, Rötung oder Bleichung (Durchglühen) der umliegenden Verfüllschichten bzw. Ruß oder Verbrennungsspuren an größeren Kieseln verbunden war, kann ausgeschlossen werden, dass die Holzkohlen durch Feuer entstanden, die *in* den Schächten brannten. Alle diese Holzkohlen entstanden also nicht in den Schächten, in denen sie aufgefunden wurden, sondern die Kohlen wurden von der Oberfläche in diese eingefüllt.

Zum zeitlichen Verhältnis zwischen *Schachtnutzung und -verfüllung* ist zu bemerken, dass sich kein Schacht fand, der während seines Betriebes einstürzte. In den bis 2003 andauernden Grabungen der Kreisarchäologie Kelheim wurde lediglich ein Schacht gefunden, der wohl wegen Einsturzgefahr aufgegeben wurde (RIND 2004, 60). Damit bleibt der nach Versturz aufgegebene Schacht am Ostrand der Grube Buchenrieder bisher der einzige derartige Befund (ENGELHARDT 1983, 70). Nur dreimal konnte bei den DFG-Grabungen ein Wandversturz zwischen zwei Schächten beobachtet werden: zwischen Nr. 133 und 134 in Pl. 3, zwischen Nr. 124 und Nr. 163 sowie zwischen Nr. 177 und Nr. 178, beide in Pl. 4 (zur Lage s. u. Abb. 2.6). Einmal ließ sich der Zeitpunkt des Wandeinsturzes ermitteln (Nr. 177 und Nr. 178 in Planum 4): Er erfolgte sicher nach der Aufgabe der Schächte, weil beide auf einem tieferen Planum (Pl. 5) noch als getrennte Befunde erscheinen. Die Situation lässt sich gut mit dem Modell erklären, wonach die Schächtwände beim Verfüllen durch die Bergleute dort ausbrachen, wo das herab geschüttete Füllmaterial im Fallen an die Wand schlug (vgl. u. 2.1.5.). In seltenen Fällen führte ein starkes Ausbrechen der Stöße dabei zu dem beschriebenen völligen Zusammenstürzen der Trennwand zwischen zwei benachbarten Schächten. Stoß ist die Bergmannsbezeichnung für Wand. Ein Befund wie die zwei ineinander verstürzten Schächte entstand also zusammen mit dem Bergbau und nicht irgendwann später. Nach den Erfahrungen mit Profilwänden bei der Ausgrabung erhielten sich Wände, die einem Sedimentdruck widerstehen mussten, vor allem in den Schottern bei Regenwetter nur wenige Wochen (zur Standfestigkeit s. o. 1.5.).

In jedem Fall mussten die neolithischen Bergleute aus sicherheitstechnischen Gründen einen toten Mann nach der Nutzung verfüllen – so werden in der Bergmannssprache aufgelassene Schächte bezeichnet. Das spontane Einbrechen eines toten Manns hätte die Menschen an der Oberfläche in mehreren Metern Umkreis stark gefährdet und den Abbau innerhalb dieses Radius verhindert. Es ist daher hochwahrscheinlich, dass die Verfüllung eines Schachtes sich in der Regel stets unmittelbar an seine Aufgabe anschloß. Demnach entstanden alle datierten Schachtverfüllungsschichten mehr oder weniger zeitnah zu Nutzung und Aufgabe der Schächte. Das sagt jedoch nichts über den Zusammenhang zwischen den Schächten, den Schichten und den datierten Proben aus. Zu klären bleibt, *welche* Holzkohle *wie* in das Material der Schachtverfüllungen gelangte.

Es bleibt festzuhalten: *die Holzkohlen entstanden durch Verbrennungsvorgänge an der Oberfläche und wurden irgendwann nach ihrer Entstehung in die Schächte eingefüllt.* Das zeitliche Verhältnis zwischen den Prozessen, bei denen die Holzkohlen entstanden, und ihrer Verfüllung in die Schächte wird noch zu erörtern sein. Die Daten bilden also jeweils nur einen terminus post quem für die Verfüllung ihrer Herkunftsbefunde.

Zunächst stellen sich die *Datierungsergebnisse* als ein sehr heterogener Datensatz dar. Ihre Spannweite bei den unkalibrierten Mittelwerten der Einzeldaten reicht von 6705 BP bis 5410 BP. Vier der Daten (KN-Nrn.: 5411, 5338, 5412 und 5414) erscheinen wegen der für ihr neolithisches Alter unüblich hohen Standardabweichungen von über 100 ¹⁴C-Jahren zunächst als wenig aussagekräftig. Bei allen anderen liegen die unkalibrierten Standardabweichungen in einer engen Spanne zwischen 40 und 70 Jahren, nur zweimal sind etwas größere Werte (KN 5415: 80 Jahre und KN 5337: 95 Jahre) zu verzeichnen. Die vier sehr hohen Standardabweichungen sprechen aber nicht gegen die Verwendung dieser Daten. Die hohen Streuungen besitzen zwei Ursachen. Einmal handelte es sich um Proben mit geringen Holzkohleanteilen in einer überwiegend sandigen Probenmatrix. Zum anderen kann bei Sammelproben, auch wenn sie aus einer Schicht stammen, nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne ältere oder jüngere Holzkohlefitter in sie gelangten. Die Diskussion wird zeigen, dass diese Daten sich weitgehend unauffällig in die Datenserie integrieren lassen.

Betrachtet man die Abfolge der *kalibrierten Datensätze* genauer, fällt ihre zeitlich diskontinuierliche Abfolge mit einem Wechsel zwischen dicht belegten Zeitbereichen und Lücken auf (**Abb. 2.6**).

Zunächst sei die Überlegung verfolgt, die Struktur der Abfolge sei auf den *Kalibrationskurvenverlauf* zurückzuführen. Ihr Verlauf weist innerhalb der Spannweite der kalibrierten Daten (65%-Niveau der Einzeldaten: 5755–4127 cal BC) sechs Bereiche stärkerer Unregelmäßigkeiten auf. Diese werden in Abbildung 2.5 als “Plateaus“ bezeichnet. Sie betreffen in fünf Fällen je ein knappes Jahrhundert an Kalenderjahren um 5600 v. Chr. (Plateau 1), um 5400 v. Chr. (Plateau 2), um 4900 v. Chr. (Plateau 3), um 4400 v. Chr. (Plateau 4) und um 4300 v. Chr. (Plateau 5). Nur die letzte Kurvenunregelmäßigkeit erstreckt sich über einen doppelt so großen Bereich von etwa 4200 v. Chr. bis 4000 v. Chr. (Plateau 6). Daten, die in solche Kurvenbereiche fallen, werden dadurch “gestreut“, d. h. ursprünglich auf einem kleineren Skalenabschnitt der Y-Achse (BP bzw. ¹⁴C-Skala) angeordnete Messungen erfahren eine Verteilung über einen wesentlich größeren Abschnitt der X-Achse (Sonnenjahrkalenderskala).

Aus dem Bereich der ersten beiden Plateaus liegen nur drei *älterbandkeramische Daten* vor. Es ist daher schwer zu entscheiden, wie stark hier der Plateaueinfluss ausfällt. Das älteste Datum (KN 5411: 5624 +/- 133 cal BC) besitzt nach der Kalibration weiterhin eine sehr hohe Standardabweichung (133 Kalenderjahre). Trotz der Lage seines Mittelwertes im 57. Jh. v. Chr. ist es meiner Meinung nach dem Zeitabschnitt der Bandkeramik zuzuweisen. Der Bereich, innerhalb dem es mit 95 Prozent Wahrscheinlichkeit liegt, erstreckt sich nach oben – zum Jüngeren hin – bis 5358 v. Chr. Das älteste Datum muss also nicht als spätmesolithisch angesehen werden.

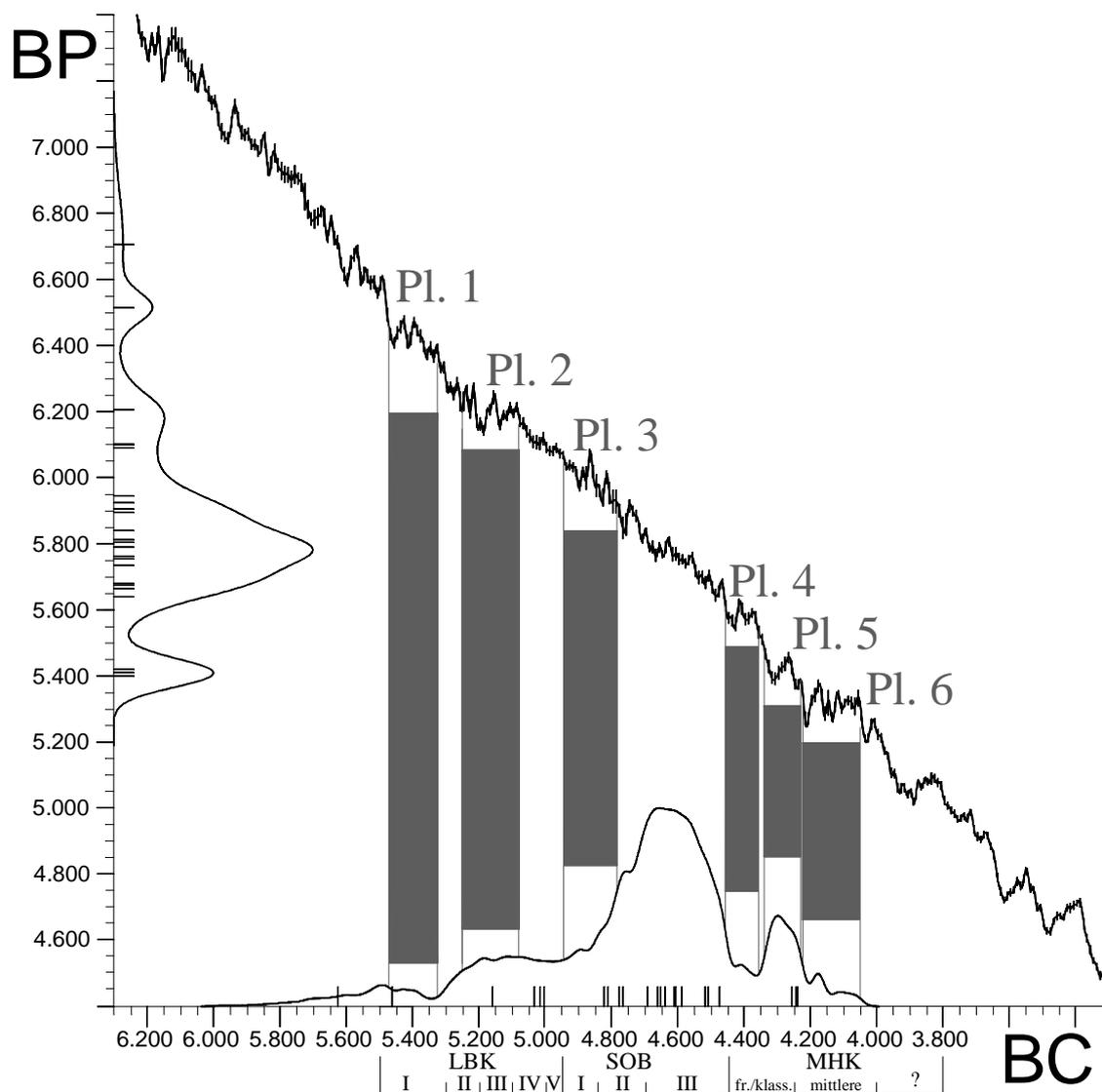


Abb. 2.6: Abensberg-Arnshofen. Kalibration der ^{14}C -Daten von Holzkohlen aus Schächten des Bergwerkes (Grabungen 1999 bis 2004).

Die Chronologie von LBK, SOB und MHK richtet sich nach Herren (dies. 2003, 151 ff.: Beginn SOB I: 4950 v. Chr., SOB II: 4840 v. Chr., SOB III: 4700 v. Chr.) und Bürger (ders. 2004: Beginn MHK 4450 v. Chr., mittleres MHK 4250 v. Chr.). Mit den grauen senkrechten Linien sind mehrere Plateaus der Kalibrationskurve (vgl. Text; Pl. 1 bis Pl. 5) in ihrem Bezug zur Datenverteilung hervorgehoben. Kalibriert mit CalPal (Weninger 2000).

Wahrscheinlich wurde damit ein Feuer datiert, das in der ältesten oder älteren Bandkeramik brannte. Für diese Zeit ist noch keine Besiedlung der nächsten Bergwerksumgebung belegt. Allerdings ist bereits in der ältesten Bandkeramik die gesamte Region südöstlich von Regensburg dicht besiedelt (DAVIS 1975, Abb. 1 und 47). Die nächsten Siedlungen dieser Zeitstufe befinden sich in nur ca. 15 km Entfernung an der oberen Pfatter bei Dünzling, Kr. Kelheim (ebd.) bzw. westlich des Bad Abbacher Mühlbaches bei Bad Abbach-Weichs (SCHMOTZ 1992, 16 Abb. 1).

Wenig später – noch im 53. Jh. v. Chr. – ist mit der ältesten Phase von Bad Abbach auch eine der hier bearbeiteten Siedlungen belegt (s. u. 3.1.).

Die anderen beiden älteren, bandkeramischen Daten (KN 5410: 5461 +/- 62 und KN 5661: 5158 +/- 87 cal BC) fallen jeweils in einen Plateaubereich, so dass ihre wirkliche Kalenderlage nur unsicher innerhalb der gesamten Spannweite des betreffenden Plateaus anzusetzen ist. Mit Einschränkung ist jedoch das ältere der beiden Daten als ein Beleg für ältestbandkeramischen Bergbau im 55. oder 54. Jh. v. Chr. anzusehen (s. u.), da sein Mittelwert auf der ^{14}C -Kalenderskala genau in den steilen Bereich der Kalibrationskurve fällt, der dem Plateau 1 vorangeht. Das andere Datum kommt dagegen genau im Bereich des Plateaus 2 zu liegen und ist daher irgendwo zwischen 5350 und 5050 anzusiedeln. Insgesamt fallen in den Bereich der beiden älteren Plateaus zu wenige Daten, um erkennen zu können, ob die Gesamtstruktur ihrer Verteilung auf den Einfluss von Plateaus zurückgeht.

Zu erwägen ist, ob das ältestbandkeramische Datum (KN 5410) mit dem vermeintlich mesolithischen (KN 5411) zusammengefasst werden kann. Dabei wird von folgender Überlegung ausgegangen: die Untergrenzen der doppelten Standardabweichung auf dem 95%-Niveau (-2σ) liegen beide sehr nahe beieinander. Das eine Mal beträgt sie 5358 BC (KN 5411), das andere Mal 5337 BC (KN 5410). Der Zeitraum, innerhalb dessen das Kalenderdatum mit 95% Wahrscheinlichkeit liegt und der zugleich in die Zeit der Bandkeramik reicht, ist also bei beiden annähernd gleich.

Festzuhalten bleibt schon jetzt: da bisher keinerlei ältestbandkeramische Siedlungsfunde im Bereich des Bergwerkes gemacht wurden, sind die Feuer, deren Holzkohlen sicher (KN 5410) bzw. hochwahrscheinlich (KN 5411) in die älteste Bandkeramik datieren, mit der Bergwerksnutzung zu verbinden. Arnhofen ist daher nach aller Wahrscheinlichkeit das älteste neolithische Bergwerk in Mitteleuropa. Wobei allerdings noch einmal ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass mit den Arnhofener Daten nur allgemein Bergbauaktivitäten und *nicht* der Schachtbau selbst datiert wird.

Nur das polnische Tomaszow kann in Mitteleuropa ein ähnlich altes Datum für frühneolithischen Bergbau vorweisen (SCHILD et al. 1985, 198). Allerdings ist dieses Datum mit 5084 +/- 115 cal BC (GrN-7591) etwa 200 Jahre jünger als die beiden Arnhofener Daten. In Arnhofen fanden die datierten Aktivitäten mit hoher Wahrscheinlichkeit vor 5337 cal BC statt (Obergrenze der 95%-Wahrscheinlichkeit; -2σ), in Tomaszow dagegen erst nach 5314 cal BC statt (Untergrenze der 95%-Wahrscheinlichkeit; $+2\sigma$).

Ein weiterer Blick auf die Kalibrationsgrafik führt zu dem Eindruck, bei der restlichen Datenreihe sei jeweils mit mehreren Proben *ein Ereignis* erfasst worden.

Diesen Eindruck kann man mit einer statistischen Überprüfung untermauern (vgl. WILLKOMM 1987). Dafür berechnet man zunächst den gemeinsamen Mittelwert \bar{x} all der Daten x_i ($i=1, 2, \dots, n$), die man für eine Gruppe hält:

$$\bar{x} = (\sum^n_i (x_i / s_i^2)) / (\sum^n_i (1 / s_i^2)) .$$

Die Variable s_i^2 ist die Varianz des Datums x_i . Man erhält sie einfach durch das Quadrieren der Standardabweichung s_i des Datums x_i . Dann wird jedes Datum durch seine quadrierte Standardabweichung geteilt und die Ergebnisse werden summiert. Danach bildet man den Quotienten aus 1 und der quadrierten Standardabweichung für jedes Datum und summiert auch hier die Resultate der Einzelschritte. Schließlich teilt man die zuerst berechnete Summe durch die zweite und erhält \bar{x} – den gemeinsamen Mittelwert der als Gruppe angesehenen Daten.

Wären die Daten einer Gruppe signifikant verschieden, so würde das Ergebnis der folgenden Formel einen bestimmten Wert überschreiten:

$$CHI^2 = \sum^n_i ((x_i - \bar{x})^2 / s_i^2) .$$

Man bildet für jedes Datum x_i ($i= 1, 2, \dots, n$) die Differenz zum gemeinsamen Mittelwert \bar{x} und quadriert diese. Das Ergebnis wird anschließend durch die jeweilige Varianz (quadrierte Standardabweichungen) geteilt. Diesen Quotienten summiert man schließlich auf und erhält den statistischen Kennwert Chi-Quadrat oder CHI^2 . Wenn ein Datum oder mehrere Daten der vermeintlichen Gruppe nicht zu dem angenommenen gemeinsamen Mittelwert \bar{x} gehören würden, würde Chi-Quadrat eine kritische Schwelle überschreiten. Ist Chi-Quadrat größer als dieser Wert, kann mit einer diesem Schwellenwert zugeordneten Sicherheit die Gruppierung abgelehnt werden. Solch ein Test beweist also nicht (!) die Zusammengehörigkeit der Daten zu einer Gruppe, er erlaubt nur, sie zu einer Gruppe zusammenzufassen.

Das Sicherheitsniveau, mit dem die Gruppierung abgelehnt werden kann wird auch als $1-\alpha$ bezeichnet. Die Schwelle ermittelt man durch Nachschlagen der Chi-Quadratwerte in einem statistischen Tabellenwerk (z. B. GEIGY 1969 oder VOGEL 1989), indem man von der Anzahl n der zusammengefassten Daten Eins abzieht und danach aus der Chi-Quadrat-Tabelle die Zeile des Ergebniswertes ($n - 1$) auswählt. Diese Zahl wird auch Anzahl der Freiheitsgrade oder ν genannt. Als Spalte wählt man normalerweise diejenige, bei der sich für das Sicherheitsniveau " $1-\alpha$ " der Wert 0,95 findet.

Im Folgenden werden bei den Angaben zur *Datengruppierung* für jede Gruppe in Klammern die Freiheitsgrade sowie der berechnete und der kritische Wert für CHI^2 angegeben. Bei allen Gruppen ist der berechnete Wert stets kleiner als der kritische, die Gruppierungen sind damit alle zulässig – aber nicht bewiesen.

Die drei jüngerbandkeramischen Daten (KN-Nrn.: 5415, 5412 und 5338) fallen in einen steilen Kalibrationskurvenabschnitt. Die Datenkonzentration ist nicht auf einen Plateaeinfluss zurückzuführen, denn es folgt ein steiler Kurvenabschnitt, auf dem keine direkt nachfolgenden Daten zu liegen kommen. Vermutlich wurde also mit diesen Holzkohlen ein Feuerereignis aus dem späten 51. Jh. v. Chr. datiert, von dem Überreste in drei verschiedene Schächte gelangten. Die Daten können zu einer Gruppe zusammengefasst werden ($\nu = 2$; $CHI^2 = 0,003$; $CHI^2_{krit} = 5,991$).

Nach einer Lücke von 145 ^{14}C -Jahren bzw. 180 Jahren der Sonnenkalenderskala folgt eine erste Gruppe von vier *frühen mittelneolithischen Daten* (KN-Nrn.: 5660, 5414, 5339 und 5659). Sie datieren in einen engen Zeitraum am Beginn des mittleren Mittelneolithikum (SOB II). Dabei fallen die beiden älteren dieser Daten noch in den Endbereich des Plateaus 3. Ihre wirkliche Lage ist daher irgendwo im 49. Jh. v. Chr. zu veranschlagen. Damit würde sich die Lücke zur spätbandkeramischen Datengruppe verkleinern, und es wäre der erste deutliche Einfluss des Kalibrationskurvenverlaufes auf die Verteilung der Daten erfasst. Allerdings liegen alle vier Daten auf der ^{14}C -Kalenderskala so eng beieinander, dass die entsprechenden Holzkohlen wiederum von einem Ereignis stammen dürften. Vorausgesetzt, es liegt kein Altholzeffekt vor, fand dieses Ereignis an der Wende vom 49. Jh. v. Chr. zum 48. Jhs. v. Chr. statt. Auch diese Gruppierung ist statistisch zulässig ($\nu = 3$; $CHI^2 = 0,383$; $CHI^2_{krit} = 7,815$).

Die Hauptgruppe der *mittelneolithischen Daten* fällt in die Zeit vom frühen 47. Jh. v. Chr. bis zum frühen 45. Jh. v. Chr. ($n=11$; KN-Nrn.: 5711, 5214, 5663, 5413, 5710, 5331, 5664, 5337, 5335, 5662, 5666). Diese Zeit entspricht in der südostdeutschen Relativchronologie der Phase SOB III. Die insgesamt 11 Daten lassen sich wiederum in drei Untergruppen aufteilen (KN-Nrn.: 5711 bis 5413, 5710 bis 5664 und 5337 bis 5666). Diese folgen in Abständen von etwa 70 bis 90 ^{14}C -Jahren aufeinander. Die erste liegt im frühen Abschnitt der Phase SOB III, die zweite in der Mitte, und die dritte am Ende dieser Phase. Die Bildung aller drei Gruppen ist statistisch zulässig (KN-Nrn. 5711 bis 5413: $\nu = 3$, $CHI^2 = 0,579$, $CHI^2_{krit} = 7,815$; KN-Nrn. 5710 bis 5664: $\nu = 2$; $CHI^2 = 0,148$; $CHI^2_{krit} = 5,991$; KN-Nrn. 5337 bis 5666: $\nu = 3$, $CHI^2 = 0,248$, $CHI^2_{krit} = 7,815$). Da die Kalibrationskurve beinahe im gesamten fraglichen Abschnitt keine größeren Unregelmäßigkeiten aufweist, können Einflüsse von dieser Seite auf die Abfolge der Datengruppen ausgeschlossen werden. Daher sind sowohl die Lage als auch die Abfolge der drei spätmitelneolithischen Gruppen rein chronologisch bedingt.

Nur das 'Ende' der mittelneolithischen Datenfolge ist von den starken Schwankungen bei der Bildung von ^{14}C in der zweiten Hälfte des 5. Jts. v. Chr. betroffen, die eine allgemeine Datierungsunsicherheit in diesem Zeitabschnitt hervorrufen (vgl. BÜRGER 2004).

Damit kann nicht entschieden werden, ob, und wenn ja, wie deutlich sich die *jungneolithische Datengruppe* wirklich von den mittelneolithischen Daten absetzt (KN-Nrn.: 5334, 5665, 5336 und Hv 14924). Das enge Beieinanderliegen der Rohdaten innerhalb von nur 20 ^{14}C -Jahren (!) bzw. das der kalibrierten Daten innerhalb von 33 Kalenderjahren legt zwar nahe, dass alle diese Holzkohlen wieder von einem Verbrennungseignis stammen. Durch die Lage inmitten der Plateaus 4 bis 6 ist eine solche Zusammenfassung allerdings mit einem sehr hohen Grad an Unsicherheit verbunden. Lediglich ihre Einordnung in das 43. Jh. v. Chr. ist noch gut zu begründen. Allerdings lässt sich auch dann aufgrund der Standardabweichungen die Zugehörigkeit zu den Zeitbereichen der beiden benachbarten Plateaus, also in die Zeit um 4400 v. Chr. bzw. zwischen 4200 und 4000, nicht ausschließen. Die Gruppierung kann zumindest statistisch nicht abgelehnt werden ($v = 3$, $\text{CHI}^2 = 0,111$, $\text{CHI}^2_{\text{krit}} = 7,815$). Gestützt auf die enge Konzentration der Rohdaten wird hier aber auch für diese Proben angenommen, dass die Holzkohlen wiederum nur von einem Verbrennungseignis stammen.

Nach einem ersten Überblick ist offensichtlich, dass die *chronologische Verteilung* der Daten auf die Kalenderachse nicht alleine durch den Verlauf der Kalibrationskurve hervorgerufen wurde. Im Gegenteil, es zeichnen sich sechs Gruppen von Daten ab: eine jüngstbandkeramische, vier mittelneolithische und eine frühjungneolithische Datengruppe. Nur bei der letzten kann man Kalibrationseffekte nicht ausschließen, ansonsten stellen sie wohl echte historische Phänomene dar. Eine Gruppierung der Daten war nach der Lage der Mittelwerte auf der Kalenderachse zunächst nur zu vermuten. Diese Diskussion zeigte, man kann im Weiteren davon ausgehen, dass die Daten in einer gruppierten Struktur vorliegen. Für jede Gruppe wird angenommen, dass ihre Daten jeweils zu einem Ereignis gehören. Holzkohlen, die dabei entstanden, gelangten dann in verschiedene Schachtverfüllungen.

Besonders bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass bei der Gruppenbildung das Datum der Ausgrabung aus den 1980er Jahren (ENGELHARDT 1990, 48) problemlos einbezogen werden konnte, obwohl es aus einer Haldenschicht und nicht aus einer Schachtverfüllung stammt. Zudem befand sich der beprobte Haldenbereich ca. 75 m nordnordöstlich bzw. 45 m östlich der anderen Befunde mit jungneolithischen Holzkohlen (Obj.-Nr. 56, 75 und 278; vgl. o. Tab. 2.1.).

Diese klar strukturierte Abfolge der kalibrierten Daten ist jedoch leider nicht mit einer ebenso deutlichen *räumlichen Verteilung der Schächte* verbunden, deren Verfüllungen datiert wurden – im Gegenteil (**Abb. 2.7**). Beprobte Schachtverfüllungen in z. T. direkter Nachbarschaft werden in Zeitabschnitte datiert, die Jahrhunderte auseinanderliegen.

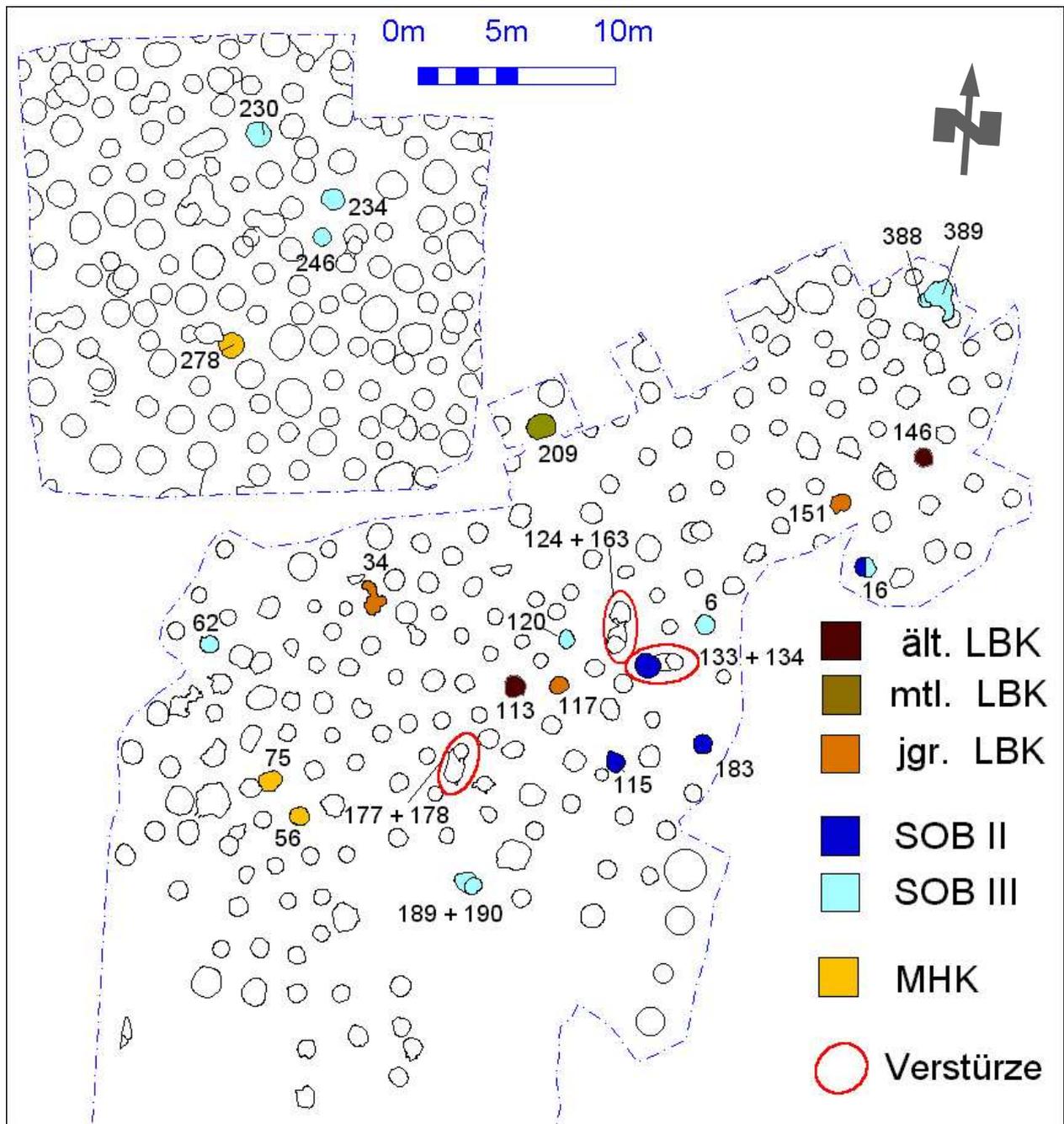


Abb. 2.7: Abensberg-Arnhofen. Lage der datierten Schachtverfüllungen auf der Grabungsfläche in der Kiesgrube.

Sie sind nach Zeitstufen getrennt farbig markiert (vgl. o. Abb. 2.5). Die drei Schachtpaare mit ineinandergreifendem Wandversturz werden durch rote Umrandung hervorgehoben. Das Nordfeld wurde nach einem Plan des Jahres 2004 kartiert (Plangrundlage Nordfeld: Kreisarchäologie Kelheim 2004). Die Zahlen sind die Befundnummern der Schächte (vgl. o. Tab. 2.1).

In der Kiesgrube lässt sich keinerlei Bezug zwischen der Lage zeitgleich datierter Schachtverfüllungen erkennen. Es ist nicht möglich, einen räumlichen Trend in der Verteilung der datierten Schachtverfüllungen zu erkennen. So gibt es beispielsweise keine Verbindung von Himmelsrichtungen und Datengruppen.

Es ist geplant, diese Aussage noch mit den entsprechenden rechnerischen Analysen zur Isotropie und räumlichen Autokorrelation der Daten in einer methodischen Studie zu gleichartigen Fragen zu untermauern. Wenn die Holzkohlen direkt mit den Schachtverfüllungen verbunden wären, könnte sich beispielsweise ein mehr oder weniger klares Muster in der Art einer sogenannten horizontalen Stratigraphie ergeben. Dies ist nicht der Fall. Wie bereits erläutert, entstanden die datierten Kohlen an der Oberfläche und nicht in den Schächten. Ihre Verteilung zeigt, dass der Kontext der Holzkohlenentstehung nicht mit der Abfolge der Schächte verbunden ist.

Die *Ungleichzeitigkeit* von datierten Feuern und Schächten belegen vor allem zwei Befunde. Diese wären unverständlich, wenn man annimmt, dass die Entstehung der Holzkohlen direkt mit der Schachtnutzung verbunden ist. Im äußersten Nordosten der Kiesgrube wird Schacht Nr. 388 von Nr. 389 geschnitten, ist also der ältere der beiden. Die Holzkohlen aus seiner Verfüllung sind aber jünger als die aus Nr. 389. Dieser Unterschied ist zudem statistisch signifikant. Eine ähnliche Situation findet sich nur etwa 15 m entfernt südsüdwestlich. Hier gelangten Holzkohlen aus zwei Zeitphasen (SOB II und SOB III) in denselben Befund (Nr. 16, s. o. Tab. 2.1). Und wiederum ist ihr Unterschied statistisch signifikant, d.h. es kann sich nicht um Kohlen von demselben Ereignis gehandelt haben. Da die Schächte nicht Jahrzehnte offen stehen konnten (s. o. 1.5.), ist eine zeitlich gestaffelte Verfüllung zudem auszuschließen.

Erklärungen erfordert zudem die *räumliche Struktur* der Datengruppen. Wenn man die Schächte (Schacht-Nrn. 62, 188/190, 230 und 388), in die gleich alte Holzkohlen aus dem spätesten Mittelneolithikum gelangten (KN-Nrn. 5337 bis 5666), mit Linien verbinden würde, entstünde eine Raute, die einen Großteil der anderen Probenherkunftsbefunde einschließen würde. Diese Schächte bilden also die "Außenkante" für den Bereich mit datierten Schachtverfüllungen. Ihr durchschnittlicher Abstand beträgt ca. 34,2 m. Die Fläche zwischen den Befunden umfasst knapp 800 m². Die Schächte mit den zeitgleichen jungneolithischen Proben liegen ebenfalls weit von einander entfernt (Schacht-Nrn. 75, 278, 56 und Binstener Fläche C Schnitt 1; KN-Nrn.: 5334, 5665, 5336 und Hv 14924; vgl. o. Tab. 2.1). Der Schnitt aus der Altgrabung mit der jungneolithischen Probe liegt etwa 25 m nordöstlich der Nordostecke des hier abgebildeten Planes. Der Abstand zu den anderen zeitgleichen Befunden beträgt 56 m bzw. 72 m. Im Durchschnitt sind die Befunde bzw. Schnitte dieser Gruppe sogar 41,3 m voneinander entfernt. Die Fläche zwischen den Befunden beträgt etwa 650 m². Die Befunde (Schacht-Nrn. 34, 117, 151) mit zeitgleichen Proben der späten Bandkeramik (KN-Nrn.: 5415, 5412 und 5338) sind nur im Vergleich mit den beiden anderen Gruppen als eng benachbart zu bezeichnen. Auch sie sind im Schnitt noch durchschnittlich 17,4 m voneinander entfernt und über eine Fläche von mindestens 70 m² verstreut.

Diese Diskussion zeigt, die Datengruppen sind in einer Weise über die Grabungsflächen verteilt, die keinerlei räumlichen Bezug zwischen gleich alten Holzkohlen erkennen lässt.

Daraus ergibt sich eine wichtige Schlussfolgerung für die *Bedeutung der räumlichen Verteilung* der datierten Schachtsedimente. Stünden sie jeweils in enger Beziehung zur Entstehung des Schachtes, aus dem sie geborgen wurden, so müsste man behaupten, der Abbau sei über den gesamten Zeitraum von der ältesten Bandkeramik bis zum frühen Jungneolithikum in völlig regelloser Weise erfolgt. Bei einem regellosen Abbau sollte das dadurch entstandene Muster der Schachtverteilung eine der beiden folgenden Anordnungsschemata aufweisen. Wurden Schächte über Jahrhunderte hinweg vollkommen wahllos plaziert, so sollte sich eine räumliche Zufallsverteilung ergeben. Geschah das Gleiche unter Berücksichtigung eines aus bergbau-technischen Gründen notwendigen Sicherheitsabstandes, so sollte dies zu einer Verteilung mit nur einem, normal verteilten Regelabstand führen, der eine sehr große Standardabweichung aufweist. Ein Zusammenhang zwischen den Schächten und den datierten Sedimenten besteht also dann, wenn die Schachtverteilung entweder vollkommen zufällig ist, oder wenn lediglich ein grob beachteter, allgemeiner Regelabstand vorliegt.

Schon aus rein logischen Gründen ist damit zu rechnen, dass neue Schächte stets direkt neben alten angelegt wurden, da man so auf ein gewisses Vorwissen zu Untergrund- und Flözbeschaffenheit zurückgreifen konnte. Mit der Annahme, dieses Vorwissen hätte keine Rolle beim Bergbau gespielt, unterstellt man den neolithischen Menschen ein irrationales Verhalten, das im krassen Gegensatz zu den durch die Schächte belegten technischen Fähigkeiten steht. Außerdem liegen archäologische Beweise für die Nutzung von Vorwissen bei der Anlage einander folgender Schächte vor (s. u. 2.1.7. Gruppe L 10).

Die hier im Vorgriff herangezogenen Ergebnisse der Schachtverteilungsanalyse zeigen (s. u. 2.1.4.), dass die Schachtverteilung nicht auf Zufall zurückgeht. Gleichzeitig belegen die signifikanten Resultate der Triangulationslinienlängenanalyse, dass es keinen einheitlichen Sicherheitsabstand gab. Beide Varianten, vollkommener Zufall und Zufall mit Regelabstand, sind demnach abzulehnen. Damit ist die Annahme, die Schächte seien archäologisch zeitgleich mit den aus ihnen stammenden Proben, sowohl formal als auch empirisch widerlegt. *Die Verteilung der datierten Proben liefert keinerlei Hinweise auf die Abfolge der Schächte.*

Für die *Datierung des Bergbaus* sind noch weitere Beobachtungen zu berücksichtigen. So gibt es vor allem im Nordfeld Überschneidungen von Schächten. Sie belegen vereinzelt, spätere Schachtbauten nach einer ersten Abbauphase auf den weitgehend abgebauten Flächen.

Man könnte hier annehmen, die bei den Probennahmen erfassten Schächte gehörten überwiegend zu diesen nachträglichen Aktivitäten. Das führt aber zu in höchstem Maße unwahrscheinlichen Konsequenzen. So ergäbe sich erstens aus formallogisch archäologischen Gründen zwingend, dass die erste Abbauphase und damit der überwiegende Teil der Schächte in die älteste Bandkeramik gehören. Die ältesten Daten wären ja dann mit der ersten, flächendeckenden Abbauphase verbunden.

Ein Blick auf den Plan zeigt nun, dass die Probenentnahmestellen, statistisch gesehen, in Bezug auf ihr räumliches Verhältnis eine Zufallsstichprobe darstellen. Diese Stichprobe müsste aber von extremen Verzerrungen betroffen sein, wenn bei 25 Daten nur zweimal die eigentliche Nutzungsphase getroffen wurde. Eine solche Verzerrung ist so hochgradig unwahrscheinlich, dass damit auch diese Annahme unhaltbar wird.

Um die bisher erkannte Problematik der Probenverteilung zu verdeutlichen, sei noch einmal zusammengefasst: *die Annahme, das Holzkohlenalter entspreche immer zugleich dem Alter des jeweiligen Schachtes, ist unhaltbar.*

Ein *Modell zur Erklärung* der Datenverteilung in Zeit und Raum muss deshalb auf andere Überlegungen zurückgreifen. Beispielsweise sollte es die komplexe Verteilung der datierten Proben erklären können. Dazu gehört eine Begründung dafür, warum jüngere Proben in älteren Befunden auftauchen, und warum statistisch unterschiedlich alte Holzkohlen im selben Befund zu finden sind. Nicht zuletzt ist darzulegen, wieso mindestens gleich dreimal jeweils gleich alte Holzkohlen völlig zusammenhanglos über die Fläche verteilt sind. Es bleibt zunächst also unklar, wie die mit den Proben datierten Ereignisse an der Oberfläche mit den Schächten zu verbinden sind. Wird dieses Problem nicht gelöst, ergeben sich ernsthafte Schwierigkeiten für die Interpretation der Daten in Bezug auf ihre räumliche und zeitliche Verteilung.

Nur eine *Voraussetzung für ein Modell* kann als gesichert angenommen werden: Die Holzkohlen stammen von Bergwerksaktivitäten. Die Antwort auf die Frage, bei welchen Aktivitäten die datierten Holzkohlen eigentlich entstanden und wie sie schließlich in die Schächte gelangten, ist hier von entscheidender Bedeutung. Um sie zu beantworten, ist ein Modell nötig, das die Genese der Datengruppen ebenso erklären kann wie ihre räumliche Verteilung.

Der *Erklärungsansatz* des folgenden Modells ist nicht nur in der Lage, diesen Anspruch zu erfüllen, sondern kann zudem noch einige weitere Fragen beantworten. Bereits während der Ausgrabungen fiel die große Häufigkeit von Holzkohlen und die beachtliche Größe einzelner Stücke in Profilen und Plana auf. So führten z. B. von den 148 vom Planum 4 geschnittenen Schächten 44 Holzkohle. Mit einem Planum werden aber nur wenige Promille des Volumens der bis zu 8 m tiefen Schächte erfasst. Es müssen also große Mengen an Holzkohle vorhanden gewesen sein.

Bei 15 davon waren die Kohlebrocken noch größer als 2 cm, und das obwohl sie beim Einfüllen in die Schächte über 4 m hinunterstürzten. Da Holzkohlebrocken extrem fragil sind (vgl. JUNG/WENINGER 2002, 290)^{2,3}, müssen sie an der Oberfläche wesentlich größer gewesen sein, um nach einem Aufprall immer noch solche Größen zu erreichen. Zumindest einige der verbrannten Hölzer sollten daher von Baumstämmen stammen.

Mit dem für die Planumsanlage abgegrabenen Sediment wurden stets nur wenige Promille des Gesamtvolumens der Schächte erfasst. Der bemerkenswerte Holzkohlereichtum ist angesichts des geringen Ausschnittes an erfassten Schachtvolumina erstaunlich: bei einem Schacht mit ca. 1 m Durchmesser und 6 m Tiefe erhält man durch eine Planumsanlage mit etwa 3 cm Abtrag lediglich Einblick in 0,5 % seines Volumen. Der Holzkohlereichtum ist deshalb eher noch höher zu veranschlagen.

Bereits bei den Ausgrabungen der 1980er Jahre stellten die Ausgräber das regelmäßige Auftreten von Holzkohle in den Schachtverfüllungen fest (BINSTEINER 1990, 18). Die Ereignisse, bei denen die Holzkohlen entstanden, waren also sehr zahlreich bzw. sie erzeugten jeweils große Mengen an Holzkohle. In jedem Fall entstanden dabei auch größere Kohlebrocken. Dies kann nicht allein durch die in der Halde festgestellten umgelagerten Feuerstellen verursacht worden sein (s. u. 2.2.), zumal Feuerstellen nur in der Phase vor dem Verlöschen Holzkohle produzieren. Ansonsten verglüht das Brennholz zu Asche. Außerdem ist bei solchen Feuern das Verkohlen von großen Holzstücken zu ebenso großen Kohlebrocken wenig wahrscheinlich.

Gesucht wird ein *Verbrennungsprozess*, der all diesen Anforderungen gerecht wird. Eine bestimmte Art von Feuer, die dies leistet, ist beim neolithischen Bergbau sogar zu erwarten: Rodungsfeuer zur Erschließung neuer Abbauflächen. Um die Vegetation arbeitssparend zu beseitigen, konnte man sie niederbrennen. Rodungsfeuer^{2,4} sind die einfachste Art der Beseitigung von Bewuchs vor dem Beginn einer Abbauphase. Solche Feuer führten sicher nicht zur völligen Entwaldung, sondern sie vernichteten vor allem das störende Unterholz. Dabei verbrannte auch der eine oder andere größere Baum, und es entstanden große Kohlebrocken.

Wenn man zusätzlich einzelne größere Bäume entfernen wollte, konnte man um ihre Stämme ein Feuer unterhalten, um die an- oder durchgeglühten Exemplare leichter fällen zu können.

^{2,3} Ich danke Herrn Dr. Bernhard Weninger für seinen freundlichen Hinweis auf die Ausgangsgröße der Kohlebrocken bei einer gemeinsamen Diskussion der Datierungsergebnisse.

^{2,4} Die Vermutung, Rodungsfeuer könnten die Holzkohlen erzeugt haben, wurde zuerst von Herrn Grabungstechniker Klaus Eisele, Kreisarchäologie Kelheim, ohne (!) Kenntnis der Daten allein aus praktischen Erwägungen im Winter 2001 geäußert. Ich danke Herrn Eisele für diese Anregung.

Eine Herkunft von Holzkohlen aus verkohlten dicken Baumstämmen kann die relativ großen Standardfehler bei vier der Daten verursacht haben, wenn nämlich Kohlen von vielen, z. T. Jahrzehnte auseinanderliegenden, Jahrringen in einer Probe vermischt waren.

In jedem Fall erzeugen *Rodungsfeuer* großen Mengen von Holzkohle, da die meisten Pflanzenteile nicht völlig verbrennen, sondern nur verkohlen. Damit sind bereits zwei Anforderungen an den Holzkohlegeneseprozess erfüllt: große Mengen und große Einzelstücke. Bei solchen Feuern können, wenn man sie nicht kontrolliert, trotz einer vielleicht nur punktuellen Abbauaktivität zudem größere verbrannte Flächen entstehen. Es kommt also zu einer weiten Streuung zeitgleicher Kohlen über die Bergwerksfläche. Der wahrscheinlich vor dem Bergbau auf den trockenen sandigen Flächen stockende Kiefernwald (s. o.) dürfte wie ähnliche Wälder auch heute noch sehr anfällig für Feuer gewesen sein.

Es sei ausdrücklich betont, wenn hier im Folgenden immer wieder der Begriff *Rodungsfeuer* benutzt wird, dann sind damit *nicht* große Brände gemeint, die eine großflächige Entwaldung zur Folge hatten. Vielmehr geht es um kleinere Brände, die maximal zur Auflichtung eines Waldstückes auf wenigen Hektar führten.

Da bei der Erweiterung der Bergwerksfläche oder der Rückkehr auf z. T. abgebaute Bereiche nach längerer Zeit stets aufs Neue mit Feuer gerodet werden musste, entstanden während des Bergbaus immer wieder gleich alte Holzkohlen, die über größere Räume verteilt waren.

Das *Rodungsfeuermodell* bietet demnach *Erklärungen* für die chronologische und räumliche Struktur der Datengruppen. Der Holzkohlegeneseprozess erfüllt zentrale Anforderungen an die Datierungshypothese. Man kann erklären, warum (zeitgleiche) Kohlen in einem zufälligen Muster an verschiedenen Orten auftauchen, und warum immer wieder mehrere solcher zeitgleichen Kohlen entstanden. Gleichzeitig wird verständlich, warum die Probenherkunftsbefunde zeitgleicher Daten so verstreut liegen. Nachdem die *Rodungsfeuer* abgebrannt waren, deren Kohlen mit den Probengruppen erfasst wurden, gelangten irgendwann später die dabei erzeugten Holzkohlen zusammen mit Kiesen und Sanden in die Schächte. Damit lassen sich Abstände von beispielsweise über 70 m zwischen den Münchshöfener Proben leicht erklären.

Rodungsfeuer liefern auch die einzige plausible Erklärung für die beiden problematischen Fälle bei den Befunden. Bei den sich invers zur Datenabfolge schneidenden Schächte Nr. 389 und Nr. 388 ergibt sich (s. o.), dass beide Befunde jünger sind als die jüngere datierte Kohle in 388. Als *terminus post quem* ergibt sich die Zeit nach 4309 BC (KN 5666: 4473 BC – 2 x 82 = 4309 BC; s. o. Tab. 2.1 Nr. 5). Beide Male gelangten Holzkohlen von der Oberfläche in die Verfüllung, die nicht mit dem Betrieb dieser Schächte verbunden waren. In den jüngeren Schacht gelangte dabei ältere Holzkohle, als in den von ihm geschnittenen Vorgänger.

Auch die zeitlich unterschiedlichen Daten aus einem Schacht (Nr. 16) können so erklärt werden. Von der Oberfläche wurden unterschiedlich alte Kohlen von zwei Rodungsfeuern mit eingefüllt, die beide lange vor dem Betrieb dieses Schachtes gebrannt hatten.

Die *Lage der Grabungsfläche* ist im Zusammenhang mit der Rodungsfeuerhypothese von besonderer Bedeutung^{2.5}. Bisher wurde, abgesehen von kleinen Sondagen Binsteiners (ders. 1990, 15 Abb. 3: Grabungsfläche A), nur am Südostrand des Bergwerkes ausgegraben. Wegen der in Mitteleuropa vorherrschenden Hauptwindrichtung Nordwest dürfte beinahe jedes größere unkontrollierte Rodungsfeuer, das auf dem Bergwerksareal brannte, vom Wind genau in diesen Bereich des Bergwerks getrieben worden sein. Aber auch Holzkohle, die bei anderswo auf dem Bergwerk abgebrannten Rodungsfeuern entstand, hätte von den vorherrschenden Winden in den Bereich der Grabungsfläche getragen werden können.

Es ist auch denkbar, dass die *neolithischen Bergleute* in den späteren Nutzungsphasen gezielt alte Holzkohlen von früheren Rodungen aufsammelten, um mit diesem exzellenten Brennstoff ihre Wirtschaftsfeuer zu betreiben. Auf diese Weise wären systematisch (!) größere Mengen alter Holzkohle immer wieder in wesentlich jüngere Bergwerksbereiche verlagert worden. Dabei konnten die übriggebliebenen Kohlen dann mit der nachträglichen Verkippung der Feuerstellenreste in die Schachtmünder gelangen (vgl. zu den Feuerstellen 2.2.).

Die Herkunft der Holzkohlen aus Rodungsfeuern erklärt eine weitere Eigenschaft der *Datenreihe*, nämlich, warum mit abnehmenden Probenalter immer mehr Daten vorliegen (**Abb. 2.8**).

Es datieren allein 10 der 25 Proben in die beiden Jahrhunderte um die Mitte des 5. Jts. v. Chr. Geht man davon aus, dass – wie bereits von Binsteiner vermutet (ders. 1990, 30) – der heutige Rand des Bergwerkes auf die späten Bergbauphasen zurückgeht, löst sich dieses Problem auf. Im Vorgriff auf weitere Ergebnisse ist Binsteiners Ansicht in diesem Punkt zu bestätigen (s. u. 2.1.6.). Auch die Anordnung der Schachtgruppen spricht klar für eine Ausweitung des Bergbaues, bei dem man von Nordwesten her auf die im Projekt ausgegrabenen Flächen vordrang. Demnach näherten sich die Zonen, in denen bei Rodungsfeuern Holzkohlen entstanden, mit jeder Ausweitung des Abbaus den hier untersuchten Grabungsflächen. Die im späten Mittelneolithikum vorgenommenen Rodungen lagen also näher an den Grabungsflächen, als die älteren Rodungen. Die Chance der Holzkohlen, in die Schachtverfüllungen zu gelangen, stieg immer mehr an, je näher die Rodungen dem heutigen Bergwerksrand kamen.

^{2.5} Auf die besondere Lage der Grabungsfläche in Bezug auf mögliche vom Wind beeinflusste Feuer bzw. verlagerte Holzkohlen machte mich freundlicherweise Herr Guido Nockemann M.A., Köln, aufmerksam.

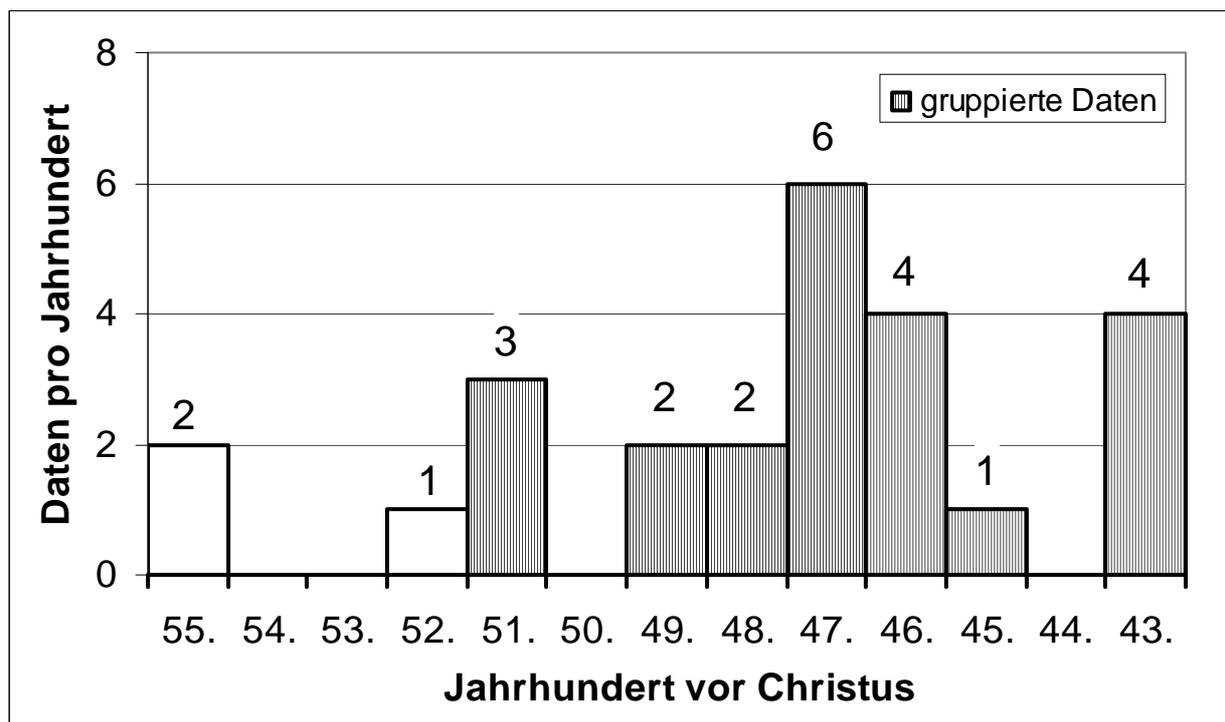


Abb. 2.8: Abensberg-Arnhofen. Anzahl der ^{14}C -Daten pro Jahrhundert vor Christus. Die Höhe der Säule gibt die Anzahl der Daten wieder (vgl. o. Tab. 2.1 und Abb. 2.5). Der senkrecht schraffierte Teil der Säule zeigt den Anteil der statistisch sicher zu Gruppen zusammengefassten Daten. Die Daten wurden nach ihrem Mittelwert den Jahrhunderten zugeordnet. Das älteste Datum (KN 5411: 5624/133 BC) wird hier dem 55. Jh. v. Chr. und damit der ältesten Bandkeramik zugerechnet.

Anders ausgedrückt, je später die Rodungen erfolgten, desto höher war die Chance der dabei entstandenen Holzkohlen, in die ausgegrabenen Befunde zu gelangen. Deshalb stammen 15 der 25 Daten aus den letzten fünf Jahrhunderten der mindestens zwölf Centennien (5400 v. Chr. bis 4200 v. Chr.) umfassenden Datenreihe.

Bemerkenswert ist zudem, dass *Gruppierungen* bei den jüngeren Daten – abgesehen von der letzten Gruppe – einfacher waren (**Abb. 2.8**: senkrechte Schraffur). Die Überlieferungschancen verbesserten sich in dem Grad, in dem die Chance für die einzelnen Kohlen stieg, bei den Ausgrabungen erfasst zu werden. Je näher die Feuer dem heute ausgegrabenen Bereich waren, desto besser war sie. Angemerkt sei, dass die Kontrolle solcher Rodungsfeuer nicht notwendig war, wenn man sich eine Wetterlage mit stabilen Windverhältnissen aussuchte. Bei West- oder Nordwestwind war in mehreren Kilometern Umkreis keine Siedlung in Gefahr, eine Kontrolle der Feuer also nicht nötig. Jede Rodung konnte also sehr große Mengen an Holzkohle erzeugen. Interessanterweise legen neue *geoarchäologische Forschungen* nahe, dass während des gesamten Neolithikums im westlichen und zentralen Mitteleuropa außerhalb der Siedlungen häufig mittels Feuer in die Vegetation eingegriffen wurde (GERLACH 2003; ECKMEIER 2003).

Speziell in der zweiten Hälfte des fünften Jahrtausends vor Christus scheint in diesen Regionen nach der aktuellen Datenlage ein erster Höhepunkt derartiger Eingriffe zu liegen (GERLACH et al. 2006, Tab. 1). Der Schwerpunkt datiert also nur wenige Jahrhunderte nach der mittelneolithischen Häufung in der Arnhofer Datenserie.

Bereits aus dem süddeutschen Spätmesolithikum (ca. 6600 BC cal) gibt es zudem Hinweise auf das *Fällen von Bäumen* mit Hilfe von Feuer (BILLAMBOZ 1992, 295). Aus der Zeit, in die die jüngstbandkeramische Datengruppe fällt, gibt es einen interessanten Befund aus dem nördlichen Mitteleuropa, dem Bereich der spätmesolithischen Ertebölle-Kultur (um 5000 v. Chr.; SCHWABEDISSEN/SCHMIDT 1983). Es handelt sich um einen Eichenstamm, der in randlichen Vertiefungen Feuerspuren aufweist, was gut zur oben vermuteten Baumfällmethode durch Feuer setzen passt.

Ein wichtiger Aspekt bei der *Rodungsfeuerhypothese* ist die Lage des Bergwerkes. Da es keinerlei alt- oder mittelneolithische Siedlungen im Umkreis von etwa 1,0 km um die Grabungsflächen gibt und in einem Radius von ca. 500 m nur wenig fruchtbare sandige Parabraunerden auftreten, können die Rodungsfeuer nur Teil von Bergbauaktivitäten gewesen sein.

Im Zusammenhang mit dem Datierungsmodell ist die Annahme von großer Bedeutung, dass es an der Bergwerksoberfläche zur Zeit des Abbaus *alte Holzkohlen* gab. Damit ist gemeint, einige der Kohlen waren wesentlich älter, als die Bergbauaktivität, bei der sie in einen Schacht gelangten. Wenn nun gezeigt werden kann, dass eine derartige Situation auch auf anderen Bergwerken vorliegt, kann man das Modell vom Vorwurf befreien, es handele sich um ein künstliches Konstrukt. Interessanterweise ist die Existenz sehr verschieden alter Holzkohlen in oberflächennahen Haldenschichten im polnischen Bergwerk von Krzemionki gleich mehrfach belegt (BORKOWSKI 1995, 25ff.). So waren etwa die Holzkohlen aus Schichten unter der Abraumhalde von Schacht 7/610 jünger als die Kohlen, die mit dem unterirdischen Abbau direkt zu verbinden sind. D.h., hier waren nahe der Oberfläche (!) ältere Kohlen vorhanden, die durch die Abraumhalde überdeckt wurden. In den Verfüllschichten von zwei Gruben der späten Trichterbecherzeit (ca. 3300 v. Chr.) fanden sich in Krzemionki sogar Holzkohlen, die jeweils 1500 Jahre (!) älter waren und aus dem frühen Mittelneolithikum stammten. Sie gehen also auf mit Feuer verbundene Bergbauaktivitäten zurück, die über ein Jahrtausend älter waren. Auch in Krzemionki wurden die Schächte sofort nach dem Abbau verfüllt (a. a. O., 147). Das beweist, dass sich Holzkohlen bei Bergwerken nahe prähistorischen Oberflächen durchaus über mehr als tausend Jahre erhielten und schließlich in eine Schachtverfüllung gelangten. Die zunächst merkwürdig erscheinende Beziehung von Datenstruktur und Befunden in Arnhofen ist also kein Einzelfall.

Das Modell mit Feuer betriebener Rodungen, bei denen auch größere Bäume auf besondere Weise niedergelegt wurden, ist plausibel und besitzt ein hohes *Erklärungspotential*. Man kann damit sowohl die chronologische als auch die räumliche Verteilung der Datenreihe, sowohl die Menge als auch die Art (große Brocken) der Holzkohle so erklären, wie es hypothetische Nutzungserwägungen (Vegetationsbeseitigung) erwarten lassen.

Folgt man diesem an Erklärungspotential reichen Modell, ist die Kopplung zwischen der räumlichen Verteilung der Schächte, aus denen die datierten Holzkohlen geborgen wurden, und der zeitlichen Verteilung der Daten quasi ein zweites Mal aufgehoben. Schon oben wurde ja im Vorgriff auf die kommenden Abschnitte bemerkt, dass ein Bergbau, bei dem die Anlage der Schächte jeweils zeitgleich zu den aus ihnen geborgenen Proben erfolgte, aufgrund der statistischen Analyse der Schachtverteilung ausgeschlossen werden kann.

Es sei noch einmal bemerkt, dass alle Holzkohlen von Feuern stammen müssen, die auf der alten Oberfläche brannten. Erst nach dem Abbrennen dieser Feuer gelangte die dabei entstandene Holzkohle in die Schächte. Dabei könnten vereinzelt auch Vermischungen von unterschiedlich alten Kohlen entstanden sein, was schließlich zu den teils doch recht hohen Standardabweichungen führte. In bandkeramischen Siedlungsbefunden sind vermischte Holzkohlen schon länger bekannt und erst jüngst als "settlement noise" bezeichnet worden (TEGTMEIER 2006, 107). In Anlehnung daran könnte man die Situation bei den Arnhoferer Holzkohlen auch "mining noise" nennen.

Damit ist nicht gesagt, dass das hier vertretene Datierungsmodell ohne *Alternative* ist. Jedes Alternativmodell muss aber mindestens das gleiche Erklärungspotential aufweisen, um einen wissenschaftlichen Fortschritt darzustellen.

Mit dem Modell ist zugleich eine *Datierung der Schachtverteilung* verbunden. Die Genese der Holzkohlen und die Anlage der Schächte sind, wie ausführlich dargelegt, voneinander (weitgehend) unabhängige Ereignisse. Nur die Holzkohlen, die bei der letzten Rodung unmittelbar auf den ausgegrabenen Flächen entstanden, sind mit den Schächten zu verbinden. Aus einfachen logischen Erwägungen kommen für diesen terminus post quem nur die jüngsten Daten in Frage. Verfolgt man die Konsequenzen weiter, ergibt sich eine wichtige Folgerung für das zeitliche Muster der Bergwerksnutzung. Die wichtigste betrifft die Datierung der Bereiche des Bergwerks, die mit den Projektgrabungen und der Altgrabung erfasst wurden.

Den *terminus post quem* für die Abbautätigkeit bildet der Schwerpunkt der vier jungneolithischen Daten von etwa 4240 cal BC. *Die Anlage der meisten Schächte der DFG-Grabung fällt demnach in die Zeit der Münchshöfen Gruppe und dort etwa in das 43. und 42. Jh. v. Chr.*

Das betrifft zunächst einmal die meisten Schächte aus dem weitgehend von späteren neolithischen Eingriffen ungestörten Areal in der Kiesgrube (vgl. u. 2.1.4.2.). Da die weiter im Innern der Bergwerksflächen erfassten Schächte der ersten Abbauphase aufgrund der systematischen Beziehungen vermutlich nur unwesentlich älter sind (vgl. u. 2.2. Abb. 2.49), dürften auch sie überwiegend aus der Zeit der Münchshöfener Kultur stammen. Besonders im Bereich des Haldenareals könnten aber auch noch deutlich jüngere Schächte liegen (vgl. u. 2.1.4.2.). Nicht grundsätzlich auszuschließen ist zudem die Existenz von (einzelnen) mittel- oder gar altneolithischen Schächten im Bereich der DFG-Grabungen. Da sich die Lage solcher möglicher Schächte nicht auf das Verteilungsmuster auswirkte, können es – wenn überhaupt – nur sehr wenige sein. Für die grundlegende Datierung der Schachtverteilung bleibt diese unwahrscheinliche, hypothetische Möglichkeit ohne Belang.

Der im Weiteren analysierte systematische Abbau (vgl. u. 2.1.4.ff.) gehört nach aller Wahrscheinlichkeit in das 43. und/oder 42. Jh. v. Chr.

Mehrere Gründe sprechen dafür, dass der Abbau auch zur Zeit der *frühmittelneolithischen Hochphase* des Bergbaus in der hier vorgefundenen Form erfolgte. Zunächst zeigt sowohl die weiter unten beschriebene Nutzungschronologie des Arnhoferer Hornsteins als auch die wirtschaftshistorische Entwicklung in der Region eine bruchlose Tradition vom 48. Jh. v. Chr. bis zum 42. Jh. v. Chr. (s. u. 4.4. Abb. 4.28).

Aber nicht nur die enger mit dem Bergbau verknüpften Phänomene zeigen deutliche Kontinuitäten. Auch niederbayerische Kreisgrabenanlagen aus dem Mittelneolithikum wurden anscheinend nach der Jahrtausendmitte weiter benutzt und ‘gewartet‘ (BÜRGER 2000, 21). Man kann daher grundsätzlich davon ausgehen, dass auch im frühen Jungneolithikum die gleichen traditionellen Techniken verwendet wurden wie schon ein paar hundert Jahre vorher. Besonders eindrücklich manifestiert sich dies bei der Ellipsenanlage in der Siedlung von Meisterthal. Hier hat man bei der jungneolithischen ‘Renovierung‘ sogar genau die Abmessungsverhältnisse beachtet. Dies ist doppelt bedeutsam, da sowohl bei den neolithischen Vermessungen im Vorfeld des mittelneolithischen Erdwerkbaues als auch bei denen im Vorfeld des Arnhoferer Bergbaus vermutlich die gleiche Längeneinheit benutzt wurde (s. u. 2.1.4.3.).

Schließlich ist in Südosttschechien im Mittelneolithikum die gleiche Bergbautechnik belegt (OLIVA 2006), die in Arnhofen vorgefunden wurde. Im nur 310 km entfernten Bergwerk von Krumlovský les betrieb man zur Zeit der Lengyelkultur Bergbau in gleichartiger Technik.

In einem Arnhofen vergleichbaren Untergrund aus tonigem Sand wurden ebenfalls senkrechte rundliche Schächte mit leichten Weitungen an der Sohle angelegt. Zwischen Niederbayern und Mähren bestanden sowohl während der Bandkeramik als auch später Kommunikationsbeziehungen (s. u. 4.2.2. und 4.3.2.). Man kann also berechtigterweise annehmen, dass der mittelnolithische Bergbau bereits in der Systematik erfolgte, die bei den hier untersuchten Schachtverteilungen angetroffen wurde (vgl. u. 2.1.4.ff.). Grundsätzlich könnte auch der bandkeramische Bergbau zumindest in der gleichen Form als Untertagebau erfolgt sein. Schließlich zeigt der bandkeramische Brunnenbau, dass man schon seit dieser Zeit in Mitteleuropa komplizierte Formen des Tiefbaus beherrschte (STÄUBLE 2002).

Die Daten als Ausdruck von Rodungsaktivitäten aufzufassen, bei denen auch dickere Bäume verbrannten, hat noch eine weitere *chronologische Konsequenz*. Es kann bei solchen Holzkohleproben zu einer speziellen Form des Altholzeffektes kommen, der hier im Weiteren als Jahrringeffekt bezeichnet wird. Wenn die Kohlen von ausgewachsenen Bäumen (zwischen 100 und 150 Jahre) stammen, können die jeweiligen ^{14}C -Daten bis zu 70 Jahre *vor* den jeweiligen Verbrennungsereignissen liegen (JUNG/WENINGER 2002, 291f). Die Probe ist in so einem Fall nämlich eine Mischung aus den unterschiedlich alten einzelnen Jahrringen. Die jüngsten Jahrringe, die ja der Verbrennung zeitlich am nächsten sind, machen nur einen Teil der Probe aus. Der Rest besteht aus älteren Jahrringen. Dies führt letztlich zu einem Probenalter, das um einige Dezenen vor dem Jahr der Verbrennung liegt. Solch ein Effekt könnte auch bei den ungewöhnlich hohen Standardabweichungen der Arnhofener Proben eine Rolle spielen (s. o. Tab. 2.1), die normalerweise im Kölner ^{14}C -Labor nicht auftreten.

Wendet man einen Verrechnungsfaktor auf die Datengruppen an, der Jahrringeffekte berücksichtigt, ergibt sich folgende *^{14}C -Chronologie der Bergwerksnutzung am Südostrand des Bergwerkes*:

der Bergbau begann im 54. Jh. v. Chr. und erlebte im 50. Jh. v. Chr. an der Wende zum Mittelneolithikum eine erste Intensivierung. In Richtung Südostrand wurde das Bergwerk in fünf weiteren Rodungsphasen zwischen etwa 4700 v. Chr. und 4400 v. Chr. erweitert. Spätestens um 4100 v. Chr. rodete man zum letzten Mal im Bereich der Ausgrabungsflächen in großem Stil. Ein Bergbau größeren Umfangs endete in diesem (!) Teil des Bergwerks noch vor der Wende zum vierten Jahrtausend.

Die aufgrund des Rodungsfeuermodells erstellte Nutzungschronologie lässt sich gut mit dem bisherigen Kenntnisstand zur Verbreitung und Nutzung des Arnhofener Hornsteins vereinbaren.

Das Ende der hier vorgestellten Datenreihe ist dabei nicht (!) mit der Beendigung des Bergbaus in Arnhofen gleichzusetzen. Das zeigt das Auftreten von Hornstein in prähistorischen Siedlungen

Das Bergbauende ist durch die *Chronologie der Hornsteinnutzung* in den neolithischen Siedlungen besser fassbar. Schon vor längerem wurde für das Arnhofener Bergwerk anhand dieses Phänomens eine indirekte bzw. abgeleitete Chronologie entwickelt (in zeitl. Reihenfolge: ENGELHARDT 1990, 49; DE GROOTH 1994, 119; ZIMMERMANN 1995, 17ff; RIND 2000b, 49ff.). Die indirekte Chronologie der Hornsteinnutzung erfuhr in den letzten Jahren größere Veränderungen, die im Folgenden im Detail vorgestellt werden. Ein Überblick über die bis zur Jahrtausendwende bekannte vorneolithische Nutzung vom Mittelpaläolithikum bis zum Mesolithikum liegt bereits vor (RIND 2000b, 42ff.), weshalb hier nur einige ergänzende Aktualisierungen aus dem 21. Jahrhundert nachzutragen sind.

Zunächst ist der vermeintliche Neufund eines *mittelpaläolithischen Levallois-Abschlages* kritisch zu hinterfragen (RIEDER 2003, 24 Abb. 9 und 26 Abb. 10). Das unpatinierte (!) Stück mit seinen an allen Kanten umlaufenden feinen Absplitterungen könnte auch das Fragment eines unregelmäßigen Abschlages aus dem Neolithikum sein. Regelmäßige wie unregelmäßige Abschlüsse liegen zu Zehntausenden auf der von der Vegetation befreiten Bergwerksoberfläche vor (vgl. die Hochrechnungen zur Artefaktzahl unter 2.2.). Dass unter diesen riesigen Mengen – es geht um Millionen Artefakte alleine im Bereich der DFG-Grabungen – gerade die sehr seltenen mittelpaläolithischen Stücke gefunden worden sein sollen, ist von so extremer Unwahrscheinlichkeit, dass es alleine aufgrund dieses Zahlenverhältnisses ausgeschlossen werden könnte. Die Chance liegt bei eins zu x Millionen, wobei x mindestens zweistellig ist. Schließlich erinnert die Unterseite des Stückes eher an eine Frostscherbe denn eine Ventralfläche.

Bei den in der Arnhofener Halde vorhandenen Mengen kann durchaus ein etwas unregelmäßiger Abschlag auftreten. Die Bestoßung der Kanten, die in der Publikation als Retusche angesprochen wird, erfolgte vielleicht durch die zahlreichen Umlagerungen während der neolithischen Bergwerksarbeiten (s. u. 2.2.) oder Beschädigungen während der modernen Rodungsarbeiten. Das als Beleg für ein quartäres Alter angeführte Tonhäutchen auf der Artefaktoberfläche ist gerade das entscheidende Argument gegen diese Datierung und die Ansprache als mittelpaläolithisches Artefakt. Das Tonhäutchen kann nur während der Bodenbildung entstanden sein, die *nach* dem Ende des neolithischen Bergbaus zur Bildung eines tonreichen Horizontes in den Haldenschichten führte (VÖLKEL/LEOPOLD 2001; LEOPOLD/VÖLKEL 2003, 59).

Bei einem paläolithischen Stück wäre vielmehr eine Patina oder ein Überzug aus den in den Schottern auftretenden färbenden Mineralien Mangan oder Eisen zu erwarten. Solche Veränderungen werden aber nicht beschrieben. Ein Tonhäutchen dürfte sich dagegen nicht finden. Schließlich können levallois-artige Artefakte auch bei der Herstellung von Klingen entstehen (vgl. BOEDA 1994, 263 Fig. 177). Einzig aufgrund einer typologisch orientierten Sicht auf die Technologie ein einzelnes, aus Millionen heraus gegriffenes Stück als mittelpaläolithisch anzusprechen, ist daher nicht sinnvoll.

Sicher *jungpaläolithisch* sind dagegen einige Artefakte aus Arnhofener Hornstein, die sich in den aurignacienzeitlichen Schichten (zwischen 38.000 und 28.000 v. Chr.) des kleinen Schulerlochs im unteren Altmühltal bei Kelheim fanden (frdl. mdl. Mitt. Dr. Utz Böhner, Hannover). Funde aus der Gravettién-Freilandstation (zwischen 28.000 und 21.000 v. Chr.) von Salching südlich von Straubing zeigen, dass der Arnhofener schon zu dieser Zeit über mehr als 50 km transportiert wurde (WEISMÜLLER 1996, 19f. und Abb. 7).

Im *Magdalénien* ist vermutlich mit einem ersten regelhaften Abbau von Arnhofener Plattenhornstein in kleinstem Maßstab zu rechnen, da er in kleinen Mengen in vielen Fundplätzen dieser Zeit in Südwestdeutschland auftritt (AUFFERMANN 1996). In Fundstellen entlang der südlichen Schwäbischen Alb und des Donautales erreicht er in dieser Zeit in Entfernungen von 120 km bis 230 km Anteile bis zu 32 %. In der spätpaläolithischen Fundstelle Wagenhofen im Donaumoos beträgt sein Anteil sogar ca. 90 %.

Festzuhalten bleibt, in allen jungpaläolithischen Phasen, in denen das südliche Mitteleuropa besiedelt war, wurde auch Arnhofener Hornstein genutzt. Es muss daher mindestens zu Anfang dieser Besiedelung obertägig zugängliche Hornsteinvorkommen gegeben haben. Ansonsten wäre bei der Neubesiedelung nach dem Maximum der letzten Kaltzeit (um 20 000 v. Chr.) die Nutzung von Arnhofener Hornstein nicht wieder aufgenommen worden. Diese Beobachtung spricht für die im Abschnitt 1.5. vermuteten Vorkommen von Arnhofener Hornstein in den würmzeitlichen Schottern des Arnhofener Trockentales.

Die Nutzung wird im *Holozän* bruchlos weiter geführt. In den präborealen und borealen Begehungsphasen (9. und 8. Jt. v. Chr.) des Abris Ullafelsen in Tirol (1869 m NN) sind 21 % der Artefakte aus Arnhofener Rohmaterial (SCHÄFER et al. 2006, 293; vgl. SCHÄFER 1998). Im Mesolithikum gelangte das Material also ebenfalls in größere Entfernungen – von Arnhofen aus sind es über 200 km zum Ullafelsen.

Bis zum Neolithikum reißt seine Benutzung nicht mehr ab. Auf dem spätmesolithischen Fundplatz Germering "Nebel" westlich von München (zwischen 6 500 v. Chr. und 5 500 v. Chr.) ist das Arnhoferer Rohmaterial ebenso anzutreffen wie auf anderen gleichzeitigen Plätzen im bayerischen Alpenvorland (frdl. mdl. Mitt. Birgit Gehlen und Thomas Richter).

Die im *Paläolithikum und Mesolithikum* gewonnenen Mengen sind aber nach dem bisherigen Kenntnisstand äußerst gering, wenn man sie mit dem neolithischen Bergbau vergleicht. Es ist daher auch anzunehmen, dass eventuell vorhandene Abbauspuren ebenfalls nur sehr geringe Dimensionen besaßen. Da in Europa aus dem frühen Jungpaläolithikum (Lovas, Ungarn; FEUSTEL 1973, 39) und dem Spätpaläolithikum (Gojsc, Polen; HAHN 1991, 28) Untertagebergbau mit Einzelbefunden nachgewiesen ist, kann ein solches Phänomen in Arnhofen aber nicht ausgeschlossen werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelte es sich bei den Abbauspuren des Paläo- und Mesolithikums aber um kleinmaßstäbliche Bodeneingriffe. Vielleicht entsprachen sie denen der mesolithischen Radiolaritgewinnungsstelle am Bärenkopf im vorarlbergischen Kleinwalsertal (frdl. mdl. Mitt. Walter Leitner/Innsbruck).

Solche Spuren dürften bereits durch die umfangreichen neolithischen Oberflächenveränderungen zerstört worden sein (s. u. 2.2.). Die mit tiefreichenden Bodeneingriffen (bis 1,5 m) verbundene neuzeitliche Nutzung großer Teile des Bergwerkes als Baumschule hat vermutlich auf den betroffenen Flächen ebenfalls dazu beigetragen, dass neben den neolithischen Haldenschichten auch oberflächennahe, vorneolithische Abbauspuren zerstört wurden (s. o. 1.4.). In jedem Fall war Arnhofen für die Menschen der Alt- und Mittelsteinzeit nur eine Rohstoffquelle unter vielen Vorkommen im Südosten der Fränkischen Alb (vgl. BINSTEINER 1990, Beil. 1 und MOSER 1978), weshalb der Platz für sie vermutlich keine besondere ökonomische Bedeutung besaß.

Dies änderte sich grundlegend mit dem *Beginn des Neolithikums*. Bisher konnte die Nutzung während der ältesten Bandkeramik nur in Inventaren von Oberflächenfundstellen nachgewiesen werden (DAVIS 1975, 47 und Abb. 1). Trotz dieser Funde wurde von Ganslmeier noch 2002 behauptet (ders. 2002, 170), Arnhoferer Hornstein wäre in der ältesten LBK überhaupt nicht verwendet worden. Durch neue Auswertungen und Grabungen ist diese Aussage widerlegt. In Niederbayern ist er während der ältesten Bandkeramik in Mintraching sicher belegt (MATEICIUCOVÁ 2002, Karte 54 Nr. 20). Zeitgleich, noch während der ältesten Bandkeramik, beginnt die weitreichende Verbreitung von Einzelstücken des Arnhoferer Hornsteins (Friedberg-Bruchenbrücken/ Hessen [ca. 280 km]: FISCHER 2005, 14; Ostheim "Mühlweide" und Mühlheim "Simmichborn" / beide Hessen [ca. 280 km]: RAMMINGER 2003, 136; Strögen/Niederösterreich [ca. 260 km]: MATEICIUCOVÁ 2002, Karte 54 Nr. 18).

Die Gewinnungsstelle Arnhofen wurde also höchstwahrscheinlich am Übergang vom Mesolithikum zum Neolithikum ohne Unterbrechung weiter benutzt. Mit der intensivierten Nutzung, die an der weitreichenden Verbreitung zu erkennen ist, muss meiner Meinung nach der Beginn eines kontinuierlichen Bergbaus in Abensberg-Arnhofen verbunden werden.

In der *mittleren und späten Bandkeramik* trägt der Hornstein im nordwestlichen Niederbayern bereits in hohen Anteilen zur Grundversorgung der Siedlungen bei (s. u. 4.2.; DAVIS 1975; SCHÖTZ 1988). Im gesamten südlichen Deutschland und westlichen Tschechien taucht er während dieser Phasen in geringen Anteilen auf (s. u. 4.2.1. Abb. 4.3 und Tab. 4.1. mit Literatur). Da die Verbreitungsgrenze auf den Funden von Einzelstücken oder sehr geringen Stückzahlen basiert, ist ihr Nachweis eine statistische Funktion des Forschungsstandes und der Grabungsmethoden (vgl. u. 4.1.2.). Eine exakte Verbreitungsgrenze, die genau zwischen Regionen mit und ohne Arnhoferer Hornstein trennt, kann daher weder für die Bandkeramik noch für eine spätere Phase gezogen werden.

Jedenfalls muss der Abbau am Ende der mittleren und im Verlauf der späten Bandkeramik ausgeweitet worden sein. In den spätbandkeramischen Siedlungen im westlichen Pilsener Becken bestanden bereits bis zu 80% der Silexartefakte aus Arnhoferer Hornstein (BŘICHÁČEK/METLIČKA 2002, 33).

Die *Hauptnutzungsphase* des Bergwerkes ist das *Mittelnolithikum* (s. u. 4.3.2. und ZIMMERMANN 1995, 17; ENGELHARDT 1990, 50; DE GROOTH 1994, 119). Fast im gesamten südlichen Mitteleuropa wurde nun Arnhoferer Hornstein in großen Mengen genutzt. Dabei gelangten Einzelstücke noch in weit entfernte Regionen, die – bis auf den Süden – wie ein Kranz in alle Himmelsrichtungen um Arnhofen herum lagen. Zu nennen sind hier das Rheinland (Korschenbroich, ca. 460 km; KRULL/WEINER 1990), das nordhessische Werl (ca. 410 km; GABRIEL 1974, 45), Niederschlesien (Niemcza, ca. 360 km; LECH 1987, fig. 28.2) und schließlich das transdanubische Ungarn (Mórágý-Tüzköves, ca. 580 km; TRNKA 2004, 319). Das ungarische Stück stammt aus einer Lengyelzeitlichen Siedlung (Lengyelkultur: 4900 v. Chr. bis 4500 v. Chr.; TRNKA 2005, 10).

Der *Höhepunkt* der mittelnolithischen Bergbautätigkeit in Arnhofen lässt sich dabei innerhalb der etwa 500 Jahre des niederbayerischen Mittelnolithikums (4950 – 4450 v. Chr.) auf die Stufe SOB I und frühes SOB II bzw. spätes Hinkelstein und Großgartach im südwestlichen Deutschland eingrenzen (ZIMMERMANN 1995, 17).

Nach neuesten Daten zur Verbreitung kann die *Hochphase für Südwestdeutschland* sogar noch genauer zeitlich eingegrenzt werden (vgl. BINSTEINER 2005, 120 Tab. 62).

Die Voraussetzung dafür ist, dass man die bisher vorliegenden Inventare für repräsentativ hält. Dank der von Spatz erarbeiteten Feinchronologie ist es möglich (SPATZ 1996, 603 ff. Tab. 58 und Beilage 5), die meisten der von Binsteiner nur allgemein als mittelneolithisch bezeichneten Plätze relativchronologisch einzuordnen (BINSTEINER 2005, 120 Tab. 62). Fast alle dieser von Binsteiner 2005 aufgelisteten Befunde sind bei Spatz im Jahr 1996 nämlich bereits einer bzw. zwei feinchronologischen Keramikstilphase(-n) zugeordnet (**Abb. 2.9**).

Der Höhepunkt der Hochphase in Südwestdeutschland lässt sich auf nur zwei keramische Stilphasen eingrenzen (mGG A bzw. frGG und mGG A). Das entspricht absolutchronologisch einem Zeitraum von nur ein bis zwei Generationen zwischen 4950 v. Chr. und 4900 v. Chr. Die gesamte Hochphase dauert wesentlich länger (s. u.).

Dieses Ergebnis bedarf wegen seiner Bedeutung einer genaueren Erläuterung. Alle Prozentwerte wurden von Binsteiner übernommen (ders. 2005, 120 Tab. 62), die Absolutchronologie von Zimmermann (ZIMMERMANN et al. 2006, 178 Abb. 10). Werden Anteile für mehrere Befunde zusammengefasst, so wurde zunächst auf den Umfang des jeweiligen Befundinventars zurückgerechnet, und dann der Anteil der Artefakte aus Arnhofener Hornstein von dieser Menge bestimmt.

Die Datierungen der Inventare gehen auf die Korrespondenzanalyse von Spatz zurück (ders. 1996), wenn nichts anderes vermerkt wurde. Seine Seriation weist die Befunde der Fundplätze von Laufen a. N. "Sickertsgrund" (4,3 %, n = 23) und Renningen (25%, n = 8) der Phase Hinkelstein II zu (ca. 5000 v. Chr. bis 4950 v. Chr.). Aufgrund der Funde sind zudem die Plätze Ludwigsburg (5,4 %, n = 37; MEIER-ARENDE 1975, Taf. 10,12 bis 13,7) und Cleeborn (14,3 %, n = 42; SPATZ 1996, Taf. 11) allgemein der Phase Hinkelstein zuzuordnen (ca. 5050 v. Chr. bis 4950 v. Chr.). An der Schwelle zur Phase Großgartach (HST II – fGG) steht das Inventar von Leingarten-Großgartach "Kappmannsgrund" (8,8 %, n = 34). Insgesamt liegt der durchschnittliche Anteil (14 von 144 Stück) während der Phase Hinkelstein bei 9,7 %.

Als Ausdruck des Höhepunktes der Hornsteinnutzung kann man das Inventar vom Fundplatz an der Maiclerstr. 10 in Weinstadt-Endersbach "Halde II" ansehen. Dort beträgt der Anteil während des frühen mittleren Großgartach 70,2 % (n = 17; mGG A; 4925 v. Chr. bis 4900 v. Chr.). Da die Untergrenze des Konfidenzintervalls für diesen Anteilswert noch 44,0 % beträgt, dürfte der echte prähistorische Anteil nicht unter etwa 45 % bis 50% gelegen haben. In den Befunden (Nr. 12, 42, 43 und Gressstr.) der folgenden Phase (mGG A/B) vom gleichen Platz liegt der Anteil wieder nur bei 28,9 %.

Festzuhalten bleibt: Von der Bandkeramik an nimmt der Anteil über die Phase Hinkelstein zu und erreicht während des frühen Großgartach (frGG) und des frühen mittleren Großgartach (mGG A) sein Maximum, um danach wieder deutlich zurückzugehen. Ob das Maximum allerdings im frühen Großgartach (frGG) oder in der folgenden Frühphase des mittleren Großgartach (mGG A) liegt, kann nicht entschieden werden. In jedem Fall gehen die Anteile in der Region danach wieder deutlich zurück.

In den fünf Gruben (Nrn. 38, 41, 42, 43 und 47) von Schwäbisch Hall-Weckrieden "Wolfsbühl", die der Phase spätes Großgartach bis Planig-Friedberg zugewiesen werden (sGG-PF; 4850 v. Chr. bis 4750 v. Chr.), liegt der Anteil nur noch bei 19,7 % (n = 137).

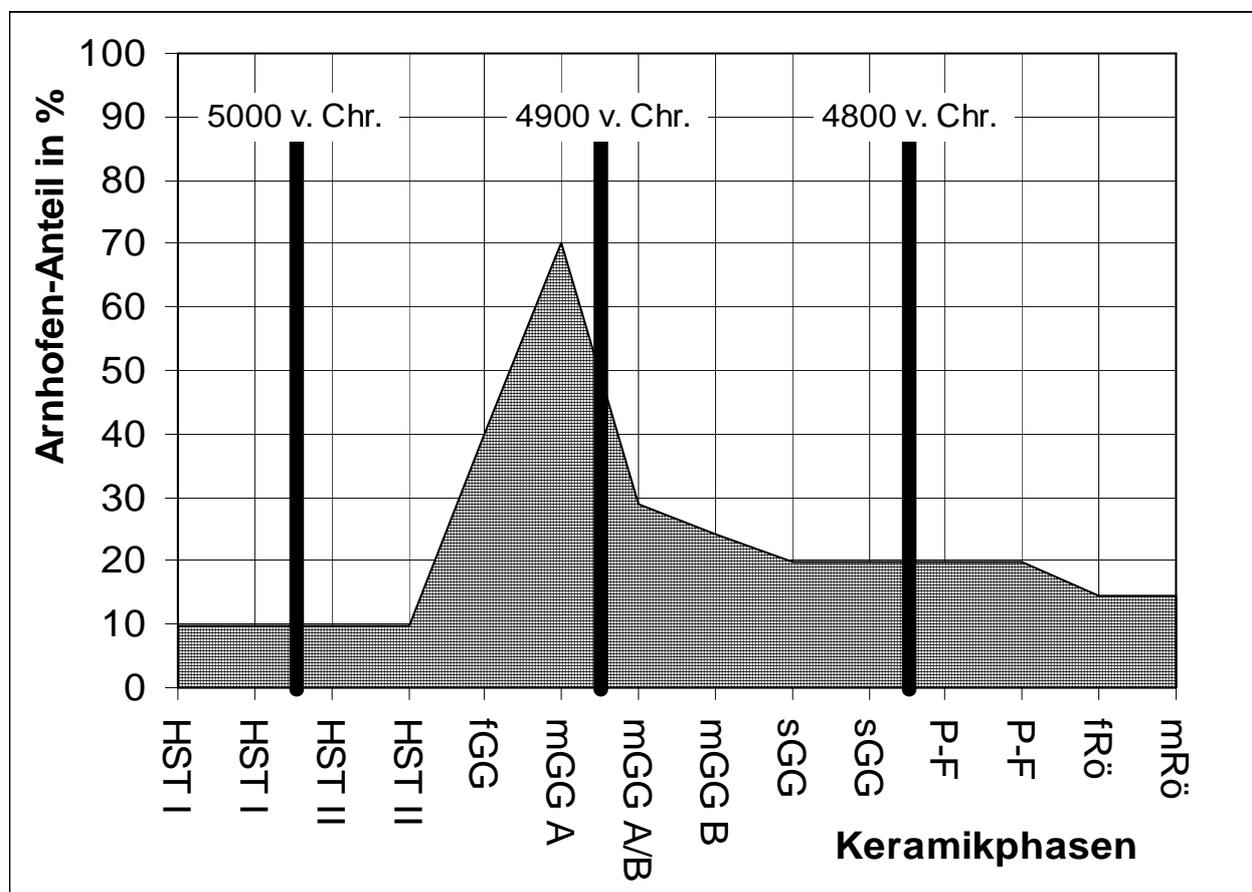


Abb. 2.9: Feinchronologie der Arnhofennutzung im zentralen Württemberg. Die Arnhofenanteile sind pro keramischer Stilphase abgetragen.

Angegeben sind die Anteile des Arnhofener Hornsteins in relativchronologisch datierten Befunden aus dem Raum zwischen der Alb, dem Kraichgau und der Hohenloher Ebene. Die Anteile sind Binstener entnommen (ders. 2005, 120 Tab. 62), die absolute Chronologie Zimmermann (ZIMMERMANN et al. 2006, 178 Abb. 10). Die Keramikphasen entsprechen der Einteilung von Spatz (ders. 1996) und besitzen die Abkürzungen „HST“ für Hinkelstein, „GG“ für Großgartach, „P-F“ für Planig-Friedberg und „Rö“ für Rössen. Die vorgeschalteten Kleinbuchstaben stehen für die frühe (f), mittlere (m) oder späte (s) Subphase. Die fehlenden Anteilswerte für die Phasen fGG und mGG B (vgl. Text) wurden linear interpoliert.

In den rössenzeitlichen Gruben vom gleichen Platz (Nr. 60 = fRö, GroßeGr. = mRö und Nr. 2/50 = mRö; 4750 v. Chr. bis 4700 v. Chr.) beträgt die relative Häufigkeit nur noch 14,4 % (22 von 153 Stück). Mit Rössen gehen die Anteile also weiter zurück.

Für das zentrale *Württemberg* liegt damit die erste detaillierte *Nutzungschronologie* des Arnhofer Hornsteins zur Zeit seiner Maximalverbreitung vor. Demnach vollzog sich der Anstieg zum eigentlichen Maximum in nur etwa vier Generationen, der Höhepunkt dauerte sogar nur zwei Generationen an. Danach nahm der Anteil wieder über etwa sechs Generationen kontinuierlich ab. Schließlich erreichte er ein Niveau, das auch noch im frühen Jungneolithikum der Region anzutreffen ist, wie der Anteil von 10,9 % (7 von 64 Stück) in der Schwieberdinger Siedlung von Remseck-Aldingen zeigt (vgl. BINSTEINER 2005, 118). *Die Hauptnutzungsphase dauerte in Württemberg von 4950 v. Chr. bis 4750 v. Chr.*

Die Situation in *Südhessen*, zeigt die gleiche Entwicklung wie in Württemberg, wenn auch zeitlich wesentlich ungenauer aufgelöst. Bekannt ist der Befund vom mittelpreolithischen Gräberfeld Trebur, Kr. Groß-Gerau. Dort treten in den Gräbern der Hinkelsteinphase die ersten Funde auf. Sie machen aber nur 4% der Artefakte aus (SPATZ 1999, 111 und 120). In den Treburer Gräbern der Phase Großgartach erreicht der Arnhofenanteil dann 32 %. Dazu passt ein Neufund aus Südbaden. Bei Grabungen in den "Offwiesen" in Singen fanden sich nur in den Gruben aus der Übergangsphase Hinkelstein-Großgartach und den Phasen Großgartach und Planig-Friedberg Artefakte aus Arnhofer Plattenhornstein. In Befunden der vorhergehenden und der folgenden Phasen fehlen sie (DIECKMANN et al. 2000, 31).

Die Daten aus Württemberg kann man demnach als gute Annäherung an die gesamte Entwicklung in Südwestdeutschland sehen.

In der näheren *Umgebung des Bergwerks* schlägt sich die Hochphase an der Wende vom Alt- zum Mittelneolithikum (ca. 4950 v. Chr.; vgl. HERREN 2003, 157 Abb. 179) im beinahe vollständigen Verschwinden von Knollenhornstein und der Vorherrschaft des für den Transport günstigeren Plattenhornsteins nieder. Diese Entwicklung ist sowohl in der Bergwerkssiedlung Mitterfecking (s. u. 3.1.2.1.) als auch in den benachbarten Abnehmersiedlungen Bad Abbach (s. u. 3.1.2.1.) und Hienheim zu beobachten (s. u. 3.1.2.1. und vgl. DE GROOTH 1994, 102ff.).

Aus vielen Regionen gibt es Erkenntnisse zum *Ende der Hauptnutzungsphase*. In den Oberflächenfundstellen im Neckarmündungsgebiet am Westrand des Verbreitungsgebietes setzt das Vorkommen von Arnhofer Hornstein in denjenigen Fundplätzen aus, die nur Rössener Funde erbrachten (LINDIG 2002, 127 Abb. 80).

Absolutchronologisch entspricht dies der Zeit nach 4750 v. Chr. (vgl. GEHLEN/SCHÖN 2005, Abb. 2; ZIMMERMANN et al. 2006, 178 Abb. 10).

Ein ähnliches Bild bietet sich am Ostrand der Verbreitung. Dort kamen in der beinahe vollständig ausgegrabenen Kreisgrabenanlage von Kamegg in Niederösterreich Artefakte aus Arnhofener Hornstein ans Licht (MATEICIUCOVA/TRNKA 2004). Der Fundplatz gehört chronologisch in den frühen Abschnitt der niederösterreichischen Variante der Lengyelkultur, der sog. MOG; dabei steht MOG für mährisch-östösterreichische Gruppe der Bemaltkeramik. Die Funde stammen aus Befunden der Phasen MOG Ia bis MOG Ib1 und setzen ab MOG Ib2 aus. Relativchronologisch entsprechen diese MOG-Phasen dem SOB II in Niederbayern. Nach Trnka ist diese Phase zudem zeitgleich mit dem späten Großgartach bzw. frühen Rössen im Rheinland (ders. 2005, 14). Sie entsprechen also der Stufe Planig-Friedberg. Da die Stufe MOG Ia ungefähr 100 bis 150 Jahre dauert (DONEUS 2001, 81ff.), die Lengyelkultur aber erst um etwa 4900 v. Chr. beginnt (TRNKA 2005, 10), ist der Kamegger Fund um 4750 v. Chr. anzusetzen und gehört damit ans Ende der Hochphase. Der Rekordhalter bei der Entfernung, der schon erwähnte Fund aus dem ungarischen Mórógy-Tüzköves (TRNKA 2004, 318), wurde in einer Lengyelzeitlichen Siedlung aufgefunden, was gut mit der Situation in Kamegg verbunden werden kann.

Eine Parallelisierung der relativchronologischen Feinabstufung von MOG und dem westlichen Mitteleuropa scheidet bisher am Fehlen einer aktuellen, auf der richtigen Anwendung moderner Methoden aufbauenden, mittelpreolithischen Gesamtchronologie für Südostdeutschland, die auch die entsprechenden Parallelisierungen mit den Nachbarregionen berücksichtigt. Erst mit dieser könnte man eine genaue Nutzungschronologie auch in Niederbayern selbst erstellen.

Der Hochphase zwischen 4950 v. Chr. und 4750 v. Chr. entsprechen nach den Auffassungen von Zapotocka zur Absolutchronologie im westlichen Tschechien relativchronologisch die Stichbandkeramikstufen III/spät bis einschließlich IVa2 (vgl. dies. 1998, 59). Nach Herren dagegen wäre der Zeitraum von SOB I und II früh mit den SBK-Stufen II bis IVa gleichzusetzen (dies. 2003, 47 und 157 Abb. 179). Wie das Fehlen von Arnhofener Hornstein in den von Sida untersuchten mährischen Inventaren der MOG bewertet werden muss, ist nicht ganz klar (ders. 2006, 417 Tab. 4). Wahrscheinlich dürfte es sich aber hier um eine Zeit handeln, die weiter westlich der späten Stichbandkeramik (Zapotocka Phase IVb) entspricht.

Damit stützen die neuen Befunde den bisherigen Kenntnisstand (ZIMMERMANN 1995, 17 und 20f.). Im westfälischen Werl beispielsweise datiert das einzige Arnhofener Artefakt nach Großgartach (a. a. O. und 138 Nr. G110; vgl. u. 4.3.1., Nr. 67 in Abb. 4.14 und Tab. 4.2b). Auf dem Rössener Fundplatz Deiringsen-Ruploh tritt er nicht auf (a. a. O. und 140 Nr. L138).

Auch die Arnhofer Artefakte aus Lich-Eberstadt stammen aus Großgartacher Befunden (a. a. O.; vgl. u. 4.3.1., Nr. 45 in Abb. 4.14 und Tab. 4.2b). Genau in die gleiche Zeit gehört das schon in den 1980er Jahren erkannte Auftreten von Arnhofer Hornstein in der frühlengyelzeitlichen Siedlung von Budmerice, Okras Bratislava-Videk, in der Westslowakei (KACZANOWSKA 1985, 76 und Karte 2; vgl. u. 4.3.1., Nr. 69 in Abb. 4.14 und Tab. 4.2b).

Im Rössener Inventar der südhessischen Siedlung von Trebur "Tannbühl" liegt der Anteil bei nur noch 4 % (ZIMMERMANN 1995, 21). An den meisten dieser Plätze setzt das Auftreten von Arnhofer Hornstein also schon im Laufe des 48. Jhs. v. Chr. weitgehend aus (zur Chronologie im westl. Mitteleuropa vgl. GEHLEN/SCHÖN 2005, Abb. 2 und ZIMMERMANN et al. 2006, 178 Abb. 10; zur Datierung des Frühlengyel TRNKA 2005, 10).

Fasst man diese Indizien zusammen ergibt sich folgendes Bild zur *Hochphase der Arnhofennutzung*: Nach einer stetigen Zunahme des Tauschumfanges vom Ende des 51. Jh. v. Chr. durch das gesamte 50. Jh. v. Chr. hinweg (vgl. u. Kap. 4.2 und 4.3.) erreichte die wirtschaftsgeschichtliche Bedeutung Arnhofens ihren absoluten Höhepunkt in den Jahrzehnten um das Jahr 4900 v. Chr. Danach verharrt sie über mehrere Generationen auf hohem Niveau. Setzt man SOB II mit Planig-Friedberg gleich (vgl. HERREN 2003, 157 Abb. 179), so liegt das Ende dieser Phase absolutchronologisch etwa um 4750 v. Chr. Da mit der Stufe Planig-Friedberg die Hochphase der Verbreitung endet (s. o. Abb. 2.9), bedeutet dies, in Niederbayern datiert der Niedergang nach SOB II. *Die Hochphase dauerte nur etwa 200 Jahre von 4950 v. Chr. bis 4750 v. Chr.*

Im SOB II ist der Beginn der Regionalisierung der Keramikverzierung mit einer allgemein beobachtbaren Siedlungsverlagerung verbunden (HERREN 2003, 156f.), und diese Veränderungen könnten mit dem Ende der Hochphase in Verbindung stehen (s. u. 4.3.4.2.).

Bevor hier weitere Fragen der Chronologie angesprochen werden können, ist noch auf einen neuerdings strittigen Punkt in der lokalen neolithischen *Chronologie Niederbayerns* einzugehen. Trotz der eindeutigen Ergebnisse von Van de Velde (ders. 1979) und der gleichlautenden Resultate von Herren (dies. 2003), wird neuerdings einzig auf der Basis typologischer Überlegungen geäußert, es müsse in Niederbayern eine Besiedlungslücke von etwa 150 Jahren (!) zwischen Alt- und Mittelneolithikum gegeben haben (RIEDHAMMER 2006, 68). Beide, Van de Velde (ders. 1979, 71) und Herren (dies. 2003, 154f. und 158), konnten dagegen mit modernen, feinchronologischen Methoden eindeutig die bruchlose und kontinuierliche Entwicklung zwischen beiden Zeitphasen belegen. Herren stellte dabei vor allem die Kontinuitäten zwischen Alt- und Mittelneolithikum in der Keramikverzierung heraus: "vielmehr ist in Harting-Nord eine regelrechte Übergangsphase von Alt- zu Mittelneolithikum festzustellen" (a. a. O., 63).

Gleiches gilt für die Besiedlungsgeschichte: “in Harting-Nord ist zwischen Alt- und Mittelneolithikum keine Unterbrechung in der Besiedlung nachweisbar“ (a. a. O. 159). Selbst die Hofplätze wurden bruchlos über die Zeitstufengrenze hinweg genutzt (a. a. O., 158).

Diese Erkenntnisse werden auch durch eigene Beobachtungen unterstützt. So sind nicht nur die hier bearbeiteten Siedlungen in der Umgebung des Bergwerks im Alt- wie im anschließenden frühen Mittelneolithikum besiedelt (vgl. o. 3.1.), sondern auch alle mir bekannten anderen Fundplätze aus dieser Fundlandschaft. Selbst wenn man also die Ergebnisse von Van de Velde und Herren nicht besäße, alleine die Siedlungsplatzkontinuität kann nicht Ergebnis zufälliger Wiederbesiedlungen sein.

Der vermeintliche *Besiedlungshiatus* ist deswegen so problematisch, weil genau in diese 150 Jahre die Intensivierung des Bergbaus in Arnhofen fällt. Das zeigen sowohl die südwestdeutsche Nutzungschronologie, als auch die Kontinuität bei den hohen Anteilen in Westtschechien, die vom Ende der Linearbandkeramik bruchlos in die Stichbandkeramik überleiten (vgl. BŘICHÁČEK/ METLIČKA 2002, 33). Die Verbreitung des Arnhofenhornsteins belegt nun indirekt, aber zwingend, die durchgehende Besiedlung zumindest des nordwestlichen Niederbayerns – denn wer sollte sonst zu dieser Zeit dort Bergbau betrieben haben? Erinnerung sei hier auch an die Arnhofer Daten, die gerade für das 50. Jh. v. Chr. die deutliche Zunahme von Rodungsaktivitäten belegen. Haben etwa Ortsfremde ohne Kenntnis der nötigen Bergbautechnik eine menschenleere Region aufgesucht und dort, Dutzende von Kilometern abseits der nächsten Siedlungen, wochenlang Bergbau betrieben?

Zur Chronologie ist festzuhalten, *die auf den aktuellsten feinchronologischen Daten beruhende Nutzungschronologie des Arnhofer Hornsteins beweist nochmals die seit Jahrzehnten gut belegte Kontinuität zwischen Bandkeramik und frühem Mittelneolithikum in Niederbayern*. Die Chronologie der Silexrohmaterialnutzung erlaubt es in diesem Fall, regionale Keramikchronologien zu synchronisieren. Hier helfen einmal die Steine, ein feinchronologisches Problem zu klären.

Abgesehen von den hier aufgezeigten Gegenbeweisen bleiben die nicht nachvollziehbaren Ansichten Riedhammers eine plausible Erklärung dafür schuldig, warum und wohin die Tausende bandkeramischer Bewohner der Region hätten auswandern sollen bzw. was ihr plötzliches Verschwinden verursachte und woher die vielen tausend mittelneolithischen Bewohner hätten plötzlich wieder auftauchen sollen (vgl. dazu u. 4.3.3.1.2.). Überhaupt ist es höchstproblematisch, wenn man – ohne die Gegenargumente von Van de Velde und Herren auch nur zu berücksichtigen – einzig aufgrund subjektiv-typologischer Argumente einen solchen Hiatus postuliert.

Zuvor müsste man zumindest überprüfen, ob die beobachteten typologischen Veränderungen nicht einfach durch die Aufnahme einer Neuerung aus einer Nachbarregion zu erklären sind, wie es Eisenhauer für den Übergang vom Alt- zu Mittelneolithikum in der Wetterau zeigen konnte (dies. 2002). Diese Ausführungen sollten zeigen, dass der vermeintliche Siedlungshiatu s im 51. Jh. v. Chr. und 50. Jh. v. Chr. nicht sinnvoll mit den aktuellen Erkenntnissen vereinbart werden kann. Diese Variante der niederbayerischen Chronologie ist abzulehnen und wird hier nicht weiter berücksichtigt.

Auch nach dem *Ende des Mittelneolithikums* muss der Abbau in Arnhofen weiterhin in beträchtlichem Umfang ohne größere Unterbrechungen betrieben worden sein, da das Rohmaterial nicht nur in Niederbayern bedeutsam bleibt (s. u. 4.4.; vgl. ENGELHARDT 1990, 49). Im frühen und auch im späten Münchshöfen, Typ Altenmarkt, wird es im nordwestlichen Niederbayern in größerem Umfang weiter verwendet (s. u. 4.4. Abb. 4.29). Welche Bedeutung der Hornstein im Vilstal spielte (SCHÖTZ 1988, 15), ist unklar, da die Angaben nur allgemein Plattenhornstein vermelden (aber vgl. u. 4.4. Abb. 4.30). Ob es sich um Arnhofener oder um dem vom Jungneolithikum an weit verbreiteten Baiersdorfer Plattenhornstein handelte, wurde von Schötz nicht mitgeteilt. Diese Angaben können somit nur als Maximalwerte für einen möglichen Arnhofenanteil angesehen werden. Im Westen zeigt der Anteilswert aus der zeitgleichen schwieberdingenzeitlichen Siedlung von Remseck-Aldingen (10,9 %: BINSTEINER 2005, 118; 44. bis 43. Jh. v. Chr.: SEIDEL 2004, 312), dass der Arnhofener auch hier noch nicht völlig außer Gebrauch kam. Er gelangte auch während des gesamten Jungneolithikums (MBK I-V) in geringen Quantitäten im einstelligen Prozentbereich im Westen bis in den Heilbronner Raum (KIESELBACH 1998, 101ff.) und im Nordwesten in Einzelstücken sogar noch bis in die Wetterau (ROTH 2000, 27f). Für die Versorgung des an Rohmaterial armen *Alpenvorlandes* scheint er sogar in der ersten Hälfte des 4. Jts. v. Chr. wieder zunehmend an Bedeutung gewonnen zu haben. Dafür sprechen die Inventare von Polling (UNDERWOOD 2003, 306; 40. Jh. v. Chr., BÜRGER 2004 Abb. 7), Reute-Schorrenried (37. Jh. v. Chr.; KIESELBACH/SCHLICHOTHERLE 1998, 156) und Merching (Altheimer Kultur; UNDERWOOD 2003, 313f.) mit jeweils ca. 20 % Inventaranteil. Bemerkenswert ist, dass er in den z. T. etwas jüngeren Altheimer Fundplätzen um Landshut regelmäßig mit einer Häufigkeit von etwa 10 % vorliegt (Ergolding "Fischergasse" 13,3 %, UNDERWOOD 2003, 190ff.; Weihestephan 13,6 %, KEHRER 2001, 180; Altheim 9,1 %, UNDERWOOD 2003, 302).

Zwar handelt es sich hier um teilweise sehr kleine Inventare und Inventarstichproben, doch auch damit lässt sich belegen, dass während des gesamten Jungneolithikums der Bergbau weiterbestand. Sein Umfang hatte sich allerdings gegenüber dem des frühen Mittelneolithikums stark verringert und dürfte in etwa dem der mittleren Bandkeramik entsprochen haben.

Für das *Spätneolithikum* belegen neben den chamzeitlichen Artefaktfunden (s. u. 4.4. Abb. 4.32; vgl. ENGELHARDT 1990, 50) vor allem die Funde von drei spätneolithischen Dolchen, dass auch noch in späterer Zeit Bergbau in geringem Umfang betrieben wurde. Der Horizont Cham-Jevisovice fällt in die Zeit von 3400 v. Chr. bis 2800 v. Chr. Die Funde dreier glockenbecherzeitlicher Dolche (BINSTEINER 2005, 113, Tab. 58) sprechen sogar dafür, dass in Arnhofen noch bis an die Wende zur Bronzezeit Hornstein abgebaut wurde. Die glockenbecherzeitlichen Funde stammen aus der Zeit zwischen 2500 v. Chr. bis 2200 v. Chr.

Aufgrund des völlig unzulänglichen Standes der Erforschung bzw. Publikation spätneolithischer Silexinventare in Bayern ist es (noch) nicht möglich, zu beurteilen, inwieweit vereinzelte hohe Anteile von Arnhofener Hornstein repräsentativ sind. Die Prozentwerte der Chamer Siedlung von Ergolding Kopfham, "Galgenberg" (90 %: UERPMANN 1999, 177), und des Chamer Erdwerkes von Hadersbach (maximal 82,4 %: GRILLO 1997, 52; zur Problematik ihrer Angaben vgl. u. 4.2.1.) könnten womöglich sogar eine regionale "Renaissance" des Bergbaus anzeigen.

Dass der Bergbau fortbestand, belegen die *Dolche*. Nach eigenen Experimenten braucht man für Dolche große (mindestens Format DIN A5) und vor allem fehlerlose Platten. Solche großen Plattenstücke können aber nicht von der Oberfläche des Bergwerkes oder einer alt- bzw. mittelneolithischen Bergwerkssiedlung aufgelesen werden. Derartig qualitätvolle und große Rohstücke wären in den Siedlungen gar nicht erhalten geblieben, sondern verarbeitet worden.

Einer der chamzeitlichen Dolche sei hier besonders erwähnt. Es handelt es sich um ein noch etwa 10 cm langes Spitzenfragment einer Dolchklinge, die mit Druckretusche in nordischer Manier aus einer Platte heraus gearbeitet wurde. Das unpublizierte Stück wurde im Abraum der Ausgrabung von Hienheim aufgelesen (Sammlung Bach/Saal a. d. Donau, unpubliziert). Es ist der Chamer Besiedlungsphase dieses Fundplatzes zuzuweisen (vgl. MODDERMAN 1977, 131f.).

Der am besten datierte Fund aus dieser Zeit kommt aus einem gesichertem archäologischen Kontext. Etwa 280 km vom Bergwerk entfernt wurde bei einer Ausgrabung am Wachberg bei Melk in Niederösterreich in einer Schicht des frühen Jevišovice, Fazies Wachberg, ein beinahe vollständiger, rhombenförmiger Dolch (9,5 cm erhaltene Länge) aus einer hellen Variante des Arnhofener Plattenhornsteins gefunden (TRNKA 2004, 312 Abb. 4).

Eigentlich dürfen solche Funde nicht verwundern. Schon vom Entdecker des Arnhofener Bergwerkes, Manfred Moser, wurde im heute von der Baumschule zerstörten Haldenbereich ein Dolchhalbfabrikat aufgelesen (ENGELHARDT 1983, 71; vgl. MOSER 1978, 81 Abb. 26, 63), das höchstwahrscheinlich dieser oder einer noch späteren Zeit zuzuweisen ist.

Der Umfang des spätneolithischen Bergbaus in Arnhofen ist nach der gegenwärtigen Forschungslage (Herbst 2010) nur sehr grob abschätzbar (s. o.). Der Grund für die Fortführung des Bergbaus im Spätneolithikum könnte neben dem Bestreben nach Autarkie in der Rohmaterialversorgung auch die Beschaffung besonders qualitätvollen Rohmaterials für die nun zunehmend anspruchsvolleren Bifazialgeräte gewesen sein (UNDERWOOD 2003, 380 und 399).

Das *Ende der Nutzung* von Arnhofener Hornstein schließlich ist mit den Dolchen aus den niederbayerischen Glockenbechergräbern zu verbinden (BINSTEINER 2005, 113, Tab. 58). In diesem Zusammenhang sind noch zwei glockenbecherzeitliche Pfeilspitzen aus dem Straubinger Raum zu erwähnen (eigene Rohmaterialbestimmung nach Ansicht; Dauerausstellung des Gäuboden Museums Straubing). Auch nordwestlich des Bergwerkes tauchen in ähnlichen Entfernungen noch Pfeilspitzen in Glockenbechergräbern auf, wie das Beispiel von Greding zeigt. Dort besteht mindestens eine der beigegebenen Projektilspitzen aus Arnhofener Plattenhornstein (vgl. NADLER 2006, 34 Abb. 40). Pfeilspitzen könnte man auch gut aus den homogenen Teilen von Restkernen herstellen, die auf Flächen der ehemaligen Bergwerkssiedlungen aufzulesen sind (v. a. Oberfecking aber auch Talheim oder Schoissenkager; s. u. 3.1.1.). Solche Spitzen sind also kein Beleg für das Fortbestehen des Bergbaus in Arnhofen. Betrachtet man sie zusammen mit den Dolchen, stehen sie jedoch in einem anderen Licht da. Pfeilspitzen und Dolche belegen, dass selbst im späten 3. Jahrtausend in Arnhofen noch Bergbau betrieben wurde.

Zusammengefasst lautet die *auf der Verbreitung des Arnhofener Hornsteins beruhende Chronologie* wie folgt:

In der Alt- und Mittelsteinzeit erfolgte in Arnhofen eine Rohmaterialgewinnung unbekannter Art, deren Umfang und Bedeutung verglichen mit dem der Jungsteinzeit verschwindend gering war; mindestens seit dem mittleren Jungpaläolithikum (ca. 28 000 v. Chr.) wird das Vorkommen von Arnhofen regelhaft benutzt, sobald die Region besiedelt ist; ab dem späten Jungpaläolithikum (16 000 v. Chr.) gibt es eine – nach archäologischen Maßstäben – ununterbrochene Nutzung des Rohmaterials; der neolithische Bergbau beginnt in der ältesten LBK (spätestens ab 5350 v. Chr.); eine erste Steigerung erfährt er in der mittleren LBK (ab 5150 v. Chr.);

von der späten LBK (ab 5050 v. Chr.) bis ins frühe Mittelneolithikum wird er beständig intensiviert; *die Hochphase des Bergbaus liegt im frühen Mittelneolithikum zwischen 4950 v. Chr. und 4750 v. Chr.* (SOB I spät und II früh); danach geht die Abbauaktivität vom SOB II an deutlich zurück bis sie im frühen Jungneolithikum (ab 4450 v. Chr.) auf das Niveau der mittleren Bandkeramik herab gesunken ist;

am Ende des Jungneolithikums (ab 3500 v. Chr.) sinkt die Abbauaktivität noch weiter ab; im Spätneolithikum wird zum letzten Mal in Arnhofen Bergbau in einem quantitativ erfassbaren Rahmen betrieben; der endneolithische Bergbau ist nur qualitativ anhand von Einzelstücken zu belegen; für die Zeit nach 2200 v. Chr. gibt es (bis jetzt) keinen Beleg für Bergbau in Arnhofen; *er endet wahrscheinlich um 2200 v. Chr.*

Nach dieser indirekten Chronologie ist Arnhofen eines der am längsten durchgehend benutzten Bergwerke Europas und die am längsten benutzte Silexgewinnungsstelle im südlichen Deutschland. Der Bergbau wurde – vermutlich ohne größere Unterbrechungen – ca. 3100 Jahre lang, von 5300 v. Chr. bis 2200 v. Chr. betrieben. Um das Ende genau zu erfassen, müsste man sämtliche frühestbronzezeitlichen Gräberfelder in der Region daraufhin überprüfen, ob nicht dort auch noch Artefakte aus Arnhofener Hornstein auftreten.

Zwischen der indirekten und der oben anhand der ^{14}C -Daten entwickelten Chronologie sind deutliche *Parallelen* zu beobachten.

Der vorneolithische Bergbau in Arnhofen ist in den datierten ^{14}C -Proben nicht belegt, was gegen die intensive Nutzung von Feuern zur Schaffung freier Flächen spricht. Mit den beiden ältesten ^{14}C -Datierungen ist dagegen der für die älteste LBK anzunehmende Beginn des Bergbaus direkt erfasst. Auch die ab der mittleren Bandkeramik zu postulierende Intensivierung des Bergbaus kann gut mit einem Datum (KN 5661) aus dieser Zeit verbunden werden.

Nimmt man einen Altholzeffekt von etwa 70 bis 100 Jahren an (s. o.), steht die Gruppe spätbandkeramischer Daten eigentlich für Rodungen im frühen Mittelneolithikum und damit für den Höhepunkt des Bergbaus um 4900 v. Chr. Diese Rodungen besaßen demnach sogar einen solchen Umfang, dass Holzkohlen aus dieser Zeit bereits bis zum späteren Südostrand des Bergwerkes gelangten, obwohl dort damals wahrscheinlich noch gar kein Abbau stattfand. Mit Altholz- bzw. Jahrringeffekt fallen die mittelneolithischen Daten in eine Zeit, in der nach den Funden zu urteilen, die Hochphase des Bergbaus bereits überschritten war. Dass ausgerechnet diese Phase so dicht mit Daten belegt ist, kann nach den obigen Erläuterungen nicht überraschen – für diese Holzkohlen waren die Überlieferungsbedingungen an den mit den Grabungen erfassten Bergwerksrand besser.

Umso jünger eine Abbauphase im Mittelneolithikum war, desto näher dürften die entsprechenden Rodungen dem endgültigen Bergwerksrand aus der Zeit der Münchshöfener Kultur gewesen sein – gemeint ist der bei der Ausgrabung erfasste Rand. Und desto größer war die Wahrscheinlichkeit, dass von diesen Rodungen noch Holzkohle erhalten war und in die Münchshöfener Befunde geraten konnte. Im Umkehrschluss ergibt sich allerdings, dass die spätestbandkeramische bzw. mit Jahrringeffekt frühmittelneolithische Rodung besonders intensiv gewesen sein muss. Denn von ihr gelangten schon viele Holzkohlen bis an den späteren Bergwerksrand, der damals noch außerhalb der Abbauaktivitäten lag.

Mit der *frühjungneolithischen Datengruppe* sind die letzten Rodungen im großen Stil verbunden, die bis heute am südöstlichen Bergwerksrand belegt sind. Bisher wurden keine Befunde beprobt, die Holzkohle von späteren Rodungen enthielten. Der Umfang des Bergbaus könnte so gering gewesen sein, dass kaum mehr Holzkohlen in den Bereich der Grabungsflächen gelangten und ihre Überlieferungschance somit auf Null sank. Eine andere Erklärung ist, dass im Bereich der Grabungsflächen überhaupt keine Befunde mehr angelegt und verfüllt wurden, also auch keine Holzkohlen von jüngeren Rodungen überliefert werden konnten. Demnach hätte der Bergbau auf den Grabungsflächen spätestens um etwa 4100 v. Chr. geendet. Zwischen beiden Varianten kann nach gegenwärtigem Stand nicht unterschieden werden.

Die punktfeldstatistischen Untersuchungsergebnisse der Schachtverteilung zeigen allerdings deutlich, dass im Bereich der Halde nach Beendigung des ursprünglichen systematischen Bergbaus noch einmal Schächte angelegt wurden (s. u. 2.1.4.2.). Der Zeitpunkt dieser späteren Aktivitäten konnte bisher nicht näher bestimmt werden. Die weiter unten präsentierten Ergebnisse legen zudem nahe (a. a. O.), dass das in der Halde erfasste Schachtverteilungsmuster ursprünglich das gleiche war wie in der Kiesgrube. Damit sollten die späteren Eingriffe im Bereich der Halde irgendwann nach etwa 4100 v. Chr. erfolgt sein. Wielange danach, ob wenige Jahre oder viele Jahrhunderte, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt wie gesagt nicht entschieden werden. Möglicherweise ergeben zukünftige Datierungen hier noch eine Überraschung – die Kreisarchäologie verfügt aus Grabungen der letzten Jahre noch über eine Reihe weiterer Proben sowohl aus den Schächten als auch aus der Halde.

Wie gezeigt lässt sich die auf den ^{14}C -Daten basierende Chronologie weitgehend aber nicht eins zu eins mit der Nutzungsgeschichte parallelisieren, die sich auf die Verbreitung des Rohmaterials stützt. Das ist auch gar nicht zu erwarten: Die Stichprobe "Grabungsfläche" ist mit nur ca. 0,2 ha ergrabener Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche des Bergwerkes von ca. 40 ha extrem klein (0,5 % !). Zudem liegt sie auch noch am Rand des Bergwerkes. Einen für den gesamten Bergbau repräsentativen Datenquerschnitt zu erwarten, bedarf eines extremen Optimismus.

Mit der hier vorgestellten *Datenserie* konnte der Beginn und die Hochphase des Bergbaues erstaunlich gut erfasst werden, obwohl nicht damit zu rechnen war, dass die Serie für den gesamten Bergbau repräsentativ ist. Das dürfte mit der Lage der Ausgrabungen im Lee der Bergwerksflächen zusammenhängen. Sie führte dazu, dass Feuer, die man weiter im Zentrum des Bergwerks legte – was dem Rand zu früheren Zeiten entsprach – durch die vorherrschende Nordwest-Windrichtung wohl meistens auch bis hierher getragen wurden. Dadurch kam es zu einer Anhäufung verwehelter Holzkohlen aus den Rodungsfeuern.

Die indirekte und die direkte Chronologie können in den Abschnitten, wo sie sich überschneiden, ohne größere Probleme miteinander verbunden werden.

Mit Stand Oktober 2010 harren immer noch weitere ^{14}C -Proben ihrer *Bearbeitung*. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden sie Daten aus den Jahrhunderten zwischen 5050 v. Chr. und 4450 v. Chr. erbringen. Aber auch bis zu 600 Jahre ältere oder 2200 Jahre jüngere Daten dürfen nicht verwundern. Besonders die jung-, spät- und endneolithische Nutzung ist ja bisher bei den ^{14}C -Daten unterrepräsentiert.

Nach heutigem Stand kann das Verhältnis der *Bergbauintensität* zwischen Alt- und Mittelneolithikum nur grob mit etwa eins zu sieben angegeben werden (s. u. 4.3.4.). Für das Jung- und Spätneolithikum sind nach dem lückenhaften Forschungsstand nur Vermutungen möglich. Unter Umständen entsprach die Intensität im Jungneolithikum in etwa der des Altneolithikums und die im Spätneolithikum wiederum ca. zwei Drittel dieses Umfanges. Im Endneolithikum scheint es sich nur noch um kleinmaßstäbliche Aktivitäten gehandelt zu haben.

Auf Zeitscheiben von 500 Jahren zwischen 5.500 v. Chr. und 3.000 v. Chr. gebracht, könnte man das Verhältnis der jeweiligen Abbauintensität etwa in folgender Reihe darstellen: 4-28-3-3-2 (LBK-MN-frJN-spJN-SN). Demnach gingen etwa zwei Drittel allen Bergbaus und dementsprechend auch der Förderung auf das (frühe) Mittelneolithikum zurück.

Abschließend seien noch zwei Überlegungen angemerkt. Die eine betrifft die *Auswertungsmöglichkeiten großer ^{14}C -Datenserien*. Sieht man die Holzkohlen als Rodungsanzeiger, so kann man die absolute Häufigkeit von Daten, also in der Kalibrationsgrafik die Höhe des Graphen über der X-Achse (Kalenderjahrachse) bzw. die Fläche unter dem Graphen, mit gewissen Einschränkungen als ‘Proxy‘ für die allgemeine Intensität des Bergbaus in Arnhofen verstehen (vgl. o. Abb. 2.6).

Wenn durch zukünftige Forschungen einmal eine entsprechend große, repräsentative Datenreihe erzeugt wird, die alle Bergbauphasen über das ganze Neolithikum hinweg umfassen, ließen sich Schätzungen zum Bergwerksoutput 'eichen'. Je intensiver die Rodung und damit der Bergbau war, desto mehr Daten lägen aus dieser Phase vor. Bisher erfolgten solche Schätzungen nur 'linear', d.h. die Gesamtwerte (Fläche, Schachtzahl, Output) wurden mit einem über die gesamte Dauer des Arnhoferer Bergbaus gemittelten jährlichen Durchschnitt veranschlagt. Mit einer 'ge-eichten' wirtschaftshistorischen Schätzung könnten die Gesamtwerte so auf die Nutzungsphasen aufgeteilt werden, dass annähernd reale historische Größen erzeugt werden. Dafür müsste aber eine umfangreiche Serie von Datierungen aus dem gesamten (!) Bergwerksbereich vorliegen. Der Umfang der Datenserie ist dann als ausreichend zu betrachten, wenn eine Reihe von Daten für den gesamten Bergbauzeitraum existiert, die sich bei zwei Standardabweichungen überlap-pen.

Die andere Überlegung betrifft das Auswertungspotential von Rohmaterialanteilen bei *Oberflä-chenfundplätzen*. Die oben beschriebene Hochphase, während derer Arnhoferer in größeren Mengen in weit entfernte Regionen wie Südhessen oder das Prager Becken gelangte, erlaubt eine Verwendung von Rohmaterialanteilen als Datierungshilfe. Wie oben erläutert, dauert die Hoch-phase mit hohen Anteilen nur 200 Jahre von 4950 v. Chr. bis 4750 v. Chr. und ist somit relativ kurz. Im Fall sehr hoher Anteile kommt sogar nur ein extrem kleiner Zeitkanal von vielleicht 50 Jahren um 4900 v. Chr. in Frage. Für eine derartige Schlussfolgerung muss es sich allerdings um eine sehr große Fundmenge handeln ($n > 500$), um Zufallseinflüsse ausschließen zu können. Der Raum auf den dieses Vorgehen angewendet werden kann, ist aus den Karten des Kapitels 4.3. zu erschließen (s. u. 4.3.2. v. a. Abb. 4.14). Er umfasst das nordwestliche Bayern (westliches Mit-telfranken, Unterfranken), die Nordhälfte Baden-Württembergs, das südliche Hessen einschließ-lich der Wetterau und im Osten das böhmische Becken von Pilsen bis Prag. Oberflächenfund-plätze aus diesem Raum mit entsprechend hohen Arnhofenanteilen könnten demnach unter Be-rücksichtigung der nötigen Quellenkritik bereits nach dem Auszählen repräsentativer Si-lexstichproben dem frühen 5. Jt. v. Chr. zugeschlagen werden. In Niederbayern selbst gilt dies nur für Plätze an der oberen Vils mit extrem hohen Anteilen (>80 %).

Bei einem solchen Vorgehen ist aber vor Zirkelschlüssen zu warnen. Nach dem heutigen Stand treten derartige Befunde zwar nur in besagtem, kurzen Zeitraum auf. Argumentiert man aber, ein Platz mit hohem Anteil gehöre alleine *deshalb* in das frühe 5. Jahrtausend, ohne entsprechende weitere Hinweise zu suchen, so könnte sich der Schluss, hoher Anteil gleich frühes Mittelneo-lithikum, zum Zirkelschluss verwandeln. Nach einiger Zeit wären vielleicht einige derartige Plätze mit hohem Anteil als mittelneolithisch datiert.

Sammeln dann andere Bearbeiter wieder Fundplätze für eine Untersuchung, könnte man zu dem Schluss gelangen, Plätze aus dieser Zeit hätten hohe Anteile. Der Vorteil einer Datierungshilfe bei schlechter Quellenlage hätte sich in den Nachteil eines Zirkelschlusses verwandelt.

Grundsätzlich muss zudem stets noch die Möglichkeit des historischen Sonderfalles bzw. des "Ausnahmeplatzes" bedacht werden. Beachtet man diese Problematik, so eröffnet sich die erstaunliche Möglichkeit, anhand eines Rohmaterialanteils eine absolutchronologische Feindatierung vornehmen zu können.

Mit den vorangegangenen Ausführungen konnte die Chronologie des Arnhofener Bergwerks weitgehend geklärt werden. Es lässt sich jetzt also sagen, wann auf den Flächen der DFG-Ausgrabung Bergbau betrieben wurde. Wie diese Aktivitäten organisiert waren, werden die folgenden Abschnitte des Teilkapitels 2.1. zeigen.

2.1.3. Untersuchungsmethoden der Schachtverteilung

Die Untersuchungsmethoden einer räumlichen Verteilung müssen den Anspruch erfüllen, die bereits mit bloßem Auge sichtbaren Muster auf objektive Art und Weise abbilden zu können. Im Fall der Schachtanordnung sollten etwaige lineare Anordnungsstrukturen und ihre regelhafte Bezugnahme untereinander nachvollziehbar dargestellt werden.

Bei den Arnhofer Plänen vermeint man, bereits bei der gemeinsamen Abbildung der Schächte auf einem Plan, lineare Muster und Zugehörigkeiten zu erkennen. Jedoch: “The human eye and brain form a marvelous mechanism with which to analyze and recognize patterns, yet they are subjective, likely to tire, and so to err“ (RIPLEY 1981, 1). Es lag daher nahe, geostatistische Methoden zur Untersuchung der Schachtanordnung auszuwählen, um zu objektiven und nachprüfbaren Ergebnissen zu gelangen. Dabei sollte nicht nur eine Gliederung des optischen Eindrucks erzeugt werden, vielmehr sollten die Eigenschaften der räumlichen Verteilung so beschrieben werden, dass sich ihre Merkmale mit quantitativen Methoden untersuchen lassen.

Für diesen Anspruch erschien als erster Schritt die Kombination einer Delauney-Triangulation der Schächte (RIPLEY 1981, 38 ff.) mit der Bildung der zugehörigen Thiessenpolygone, auch Tesselierung genannt (BOOTS et al. 1992), das geeignete Verfahren (vgl. UPTON/ FINGLETON 1985, 96ff.). Beide Verfahren sind eng miteinander verwandt und Verhalten sich als sogenannte Duale zueinander (HAIGH 1991, 158).

Die *Triangulation* verbindet Objekte durch Linien untereinander, die nach einem spezifischen Algorithmus als natürliche Nachbarn definiert sind. Neben der bloßen Identifikation dieser natürlichen oder direkten Nachbarn – dem grundlegenden Schritt zur Identifikation aufeinander bezogener Schächte – stehen mit Ausrichtung und Länge der Triangulationslinien gleich zwei meßbare Eigenschaften einer räumlichen Verteilung zur Verfügung. Zusätzlich liegen damit auch die Abstände der jeweils nächsten Nachbarn vor, da sie eine Teilmenge der durch die Triangulation ermittelten direkten Nachbarn darstellen (vgl. PREISS 2006, 12ff.). Diese Abstände bieten bereits eine Reihe von weiteren Analysemöglichkeiten (STOYAN/STOYAN 1992, 321ff., UPTON/FINGLETON 1985, 70ff.; vgl. u. 2.1.4). Bei der Auswertung ist zu beachten, dass eine Delauney-Triangulation nur für den Raum der Datenpunkte innerhalb ihrer konvexen Hülle definiert ist.

Wenn die vorliegende Punktverteilung nur ein künstlicher Ausschnitt aus einem größeren Phänomen ist, entstehen zwischen den am Rand gelegenen Datenpunkten Triangulationslinien, die keine echte Nachbarn verbinden, sondern mathematische Artefakte darstellen. Diese Linien sind nicht für eine Auswertung geeignet.

Zusammenfassend kann man sagen, mit der Triangulation werden Entfernungen zwischen benachbarten Schächten und deren mögliche Anordnungsmuster visualisier- und messbar.

Mit dem verwandten Verfahren der *Tesselierung* – das ist die Bildung von Thiessenpolygonen – erfasst man dagegen einen Flächenaspekt von Objektverteilungen (umfassend BOOTS et al. 1992). Thiessenpolygone werden auch Voronoikacheln oder Dirichletzellen genannt. Bei einer gegebenen Verteilung von Punktobjekten sind diese Teilflächen folgendermaßen definiert: Das Thiessenpolygon eines Punktes besteht aus dem Ausschnitt des Raumes, der diesem Punkt näher ist, als allen anderen Punkten. Thiessenpolygone umschließen also die Fläche, die nach dem Kriterium der nächsten Nachbarschaft zu dem jeweiligen Punktobjekt ‘gehören’. Sie liefern somit Grundlagen für die Untersuchung der Flächennutzung. Im vorliegenden Fall ist ein solches Polygon als die Fläche anzusehen, welche zu dem in seiner Mitte liegenden Schacht gehört. In den Abschnitten 2.1.3. bis 2.1.7. wird der Einfachheit halber auch synonym die Bezeichnung “Schachtfläche“ verwendet. Wie bei der Triangulation ist auch hier die Fläche der am Rand liegenden Thiessenpolygone nicht sinnvoll auswertbar.

Die *Methodenkombination* von Delauney-Triangulation und Thiessenpolygonbildung ist als ein gut geeigneter Untersuchungsansatz anzusehen, da sowohl die Abstände zwischen Schächten als auch die mit dem Schachtbau verbundene Flächennutzung objektiv untersucht werden kann. Die Ergebnisse dieser Methoden werden anhand von Daten gewonnen, die eine metrische Beschreibung der Verteilung der Untersuchungsobjekte darstellen. Das einzige methodische Problem liegt in der Wahl der Punkte, die auszuwerten sind. Hat man diese Schwierigkeit gelöst, sind die ermittelten Lösungen mathematisch überprüfbar. Sie besitzen gegenüber einer rein visuellen Zusammenfassung von Schächten nach ‘gesundem Menschenverstand’ den Vorteil eindeutig und nicht arbiträr bzw. subjektiv zu sein (ZIMMERMANN 1992, 111). Kritiker der Resultate können diese jederzeit mittels einfacher GIS-Bearbeitungsschritte binnen kurzer Zeit selbst überprüfen.

Beide Verfahren arbeiten mit *Punktobjekten*. Bei Objekten mit einer flächigen Ausdehnung ist daher zunächst ein Punkt auszuwählen, der bei der weiteren Auswertung das Flächenobjekt räumlich repräsentiert. Die einzige Schwierigkeit besteht wie gesagt in der Punktauswahl. Im vorliegenden Fall stellt sich also die Frage, wo liegen die Schachtmittelpunkte? Die Antwort darauf wird weiter unten ausführlich erläutert. Aus Gründen der wissenschaftlichen Kritisierbarkeit sollten vor allem bei weitgehend automatisierten und somit vermeintlich (!) objektiven Methoden gerade die Arbeitsschritte klar herausgestellt werden, bei denen Einschätzungen, Klassifizierungen oder eine entscheidungsgestützte Vorauswahl in die Ausgangsdaten einfließen.

Zunächst sei aber ein Blick auf die *Entwicklung der Methodik* geworfen. Die archäologische Untersuchung von räumlichen Verteilungen mittels Triangulation und Tesselierung wird bereits seit längerem praktiziert (vgl. HODDER/ORTON 1976). Beim neolithischen Silexbergbau erfolgte der Einsatz dieser Methoden in den frühen 1990er Jahren in Europa zweimal unabhängig von einander. Beim polnischen Hornsteinbergwerk von Krzemionki benutzte Borkowski die Triangulationslinienlängen dazu (ders. 1995, 104ff.), um verschiedene Abbaumethoden bzw. Schachttypen entlang eines abtauchenden Hornsteinflözes zu identifizieren. Als Datenpunkte (Objektmittelpunkte) dienten ihm die tiefsten Stellen der rundlichen, trichterförmigen Senken, mit denen sich aufgegebene Schächte in der heute noch erhaltenen Halde abzeichnen. Sie bildeten sich aufgrund natürlicher Verdichtung nachträglich über verfüllten Schächten. In Arnhofen konnte dieses Vorgehen wegen der Einebnung der Oberfläche durch den (wahrscheinlich) subrezentem Ackerbau nicht angewendet werden. Stattdessen wurde die Situation auf dem Niveau der Ausgrabungsplana als repräsentativ für die Verteilung an der Oberfläche angesehen (vgl. o. 2.1.1.). Im französischen Bergwerk von Jablines erstellten Bostyn und Lanchon eine Tesselierung ihrer Bergbaugruben (dies. 1992, 90), indem sie die Mittelpunkte der meist kreisrunden Schächte in ihren Grabungsplana als Datengrundlage benutzten. Aus der Anordnung der Thiesenpolygone entwickelten sie zwei alternative Modelle zum Ablauf des Bergbaus (vgl. u. 2.1.8.). Das Vorgehen in Krzemionki zeigt, wie die *neolithische Schachtlokalisierung* erfolgt sein könnte, also wie man im Neolithikum die verfüllten aufgelassenen Schächte lokalisierte, ohne Ausgrabungsaktivitäten durchzuführen. Voraussetzung dafür ist die weitgehende Erhaltung der Haldenlandschaft. Wie das Beispiel von Krzemionki verdeutlicht, reicht bereits die Oberfläche der alten Haldenlandschaft, um die Lage von verfüllten Schächten einigermaßen gut feststellen zu können (BORKOWSKI 1995, 104ff.). Da sich die Verfüllung nachträglich noch auf natürlichem Weg durch ihr Eigengewicht verdichtet, bildet sich an der Stelle des verfüllten Schachtes obertägig eine trichterartige Senke, in deren Zentrum normalerweise der niedrigste Punkt des Trichters liegt. Hier, in der Mitte des verfüllten Schachtes wirken sich die Setzungserscheinung am stärksten aus, was zur rundlichen Trichterform der Senke führt. Solche Trichter sind noch heute in Krzemionki (ebd.) oder im tschechischen Krumlovský les in den Haldenschichten vorhanden (frdl. mdl. Mitt. Pavel Oliva/Brno).

Dieses Phänomen dürfte schon den neolithischen Bergleuten bekannt gewesen sein. Unterstellt, vor der Anlage eines neuen Schachtes habe man die Lage der alten Schächte im Bezug zur Lage des geplanten Neuen eingemessen, dann dürften auch die Neolithiker die Trichtermittelpunkte der alten Schächte als Vermessungspunkte genutzt haben.

Verständlicherweise wären dadurch aber schon die neolithischen Einmessungen von einer gewissen Unschärfe betroffen gewesen – zusätzlich zu eventuell unzureichenden Messmethoden.

Auf diese Frage wird noch zurückzukommen sein. In Arnhofen ist die alte Haldenlandschaft heute jedenfalls vollständig eingeebnet (vgl. 2.2.), weshalb eine archäologische Lokalisierung der Schächte nur mit einer Ausgrabung oder einer geophysikalischen Prospektion möglich ist (vgl. o. 1.4.).

An dieser Stelle ist es angebracht, zur Frage nach der Auswahl der *Schachtmittelpunkte* zurückzukehren. Wie wurden die Befundpläne für räumlich-quantitative Methoden nutzbar gemacht? Im vorliegenden Fall bedarf es zunächst eines Zwischenschrittes, nämlich der Erzeugung von Punktobjekten, die repräsentativ für die im Umriss als Flächenobjekte vorliegenden Schachtplana sind. Das wird notwendig, weil die Anwendung von Triangulation und Tesselierung (Bildung von Thiessenpolygonen) in den üblichen GIS-Systemen auf punktförmige Objekte konzentriert ist. Die gesuchten Punkte werden im Folgenden als Schachtmittelpunkte bezeichnet. Den Ausgang für dieses Vorgehen bildeten die in Plana dokumentierten Schachtumrisse.

Der zunächst nicht beabsichtigte Nebeneffekt dieses Vorgehens war die Abbildung der Schachtverteilung als zweidimensionale *räumliche Punktverteilung* in einer zweidimensionalen Ebene. Für solche Punktverteilungen gibt es in der Mathematik, genauer, im Bereich der stochastischen Geometrie, schon seit längerem Analysemethoden (z. B. RIPLEY 1981 oder UPTON/FINGLETON 1985; aktuell: DIGGLE 2003), die im Englischen als “point pattern analysis“ und im Deutschen als Punktfeldstatistik bezeichnet werden (STOYAN/STOYAN 1992, 217ff.). In der archäologischen Forschung kamen sie in den Jahrzehnten seit ihrer Entwicklung bisher nur selten zur Anwendung (vgl. WEBER 1993). In der englischsprachigen Forschung erfahren einige dieser Verfahren mittlerweile ein gewisses Interesse (CONOLLY/LAKE 2006, 164ff.). In der deutschsprachigen Bergwerksforschung wurden sie bisher noch gar nicht eingesetzt (Stand 10/2010).

Während der Erstellung dieser Studie wurden im Jahr 2004 etwa zeitgleich zwei höchst unterschiedliche Softwareumsetzungen für *punktfeldstatistische Methoden* entwickelt. Die Software ‘Crimestat III‘ wurde für die Anwendung in der Kriminologie entwickelt (LEVINE 2004). Sie besitzt eine benutzerfreundliche Oberfläche. Von den grundlegenden Analyseverfahren der Punktfeldstatistik wird aber nur ein Teil angeboten. Das Programm verfügt allerdings über eine Reihe weiterer Auswertungsverfahren zu räumlichen Verdichtungserscheinungen (‘hot spot analysis‘), die in Zukunft möglicherweise für archäologische GIS-Untersuchungen von räumlichen Verdichtungsprozessen zur Anwendung kommen könnten.

Bei der anderen Software handelt es sich um das Modul 'spatstat'. Es wurde im Jahr 2004 von den Mathematikern Adrian Baddeley und Rolf Turner für die Programmieroberfläche 'R' (R Development Core Team 2005) erstellt und wird seitdem ständig weiterentwickelt (BADDELEY/TURNER 2005). Die ursprüngliche Modulversion von 2004 ('spatstat 1.5-10') ist mittlerweile überholt. In dieser Studie kam die Modulversion 1.10-3 für die Version 'R 2.4.0.' zum Einsatz (Stand Januar 2007). Die Auswertungsbefehle müssen zwar von Hand eingegeben werden, dafür bietet das Modul aber ein reichhaltiges Angebot an Analysemöglichkeiten, das auf den aktuellsten Rechenverfahren aus der geostochastischen Forschung beruht.

Eine dritte, noch im Entwicklungsstadium befindliche Software namens 'Programmita' (WIEGAND 2004), wurde ebenfalls versuchsweise eingesetzt. Weil von dieser Software noch keine Vollversion existiert und sie außerdem nicht frei zugänglich ist, wurde hier aus Gründen der Nachprüfbarkeit auf eine Auswertung der damit erzielten Ergebnisse verzichtet. Da 'Programmita' aber mit Rasterkarten arbeiten kann, was die Analyse flächiger Objekte möglich macht, dürfte es nach seiner Fertigstellung für eine Vielzahl archäologischer Anwendungen interessant sein. Der archäologische Regelfall ist ja die Auswertung von Befunden, die mit ihren Umrissen als zweidimensionale flächige Objekte vorliegen.

Um die Methoden vor ihrem Einsatz einschätzen zu können, wurden zunächst provisorisch Daten mit beiden Programmen analysiert (Crimestat III und spatstat 1.10-3 für R 2.4.0.). Dadurch ist es möglich, für diese in der deutschsprachigen Archäologie noch kaum bekannten Methoden erste Empfehlungen für zukünftige Anwendungen aussprechen zu können. Für den Einsteiger bzw. für erste Schritte empfiehlt sich die Verwendung von 'Crimestat III', für die vollständige wissenschaftliche Auswertung ist dagegen der Einsatz von 'spatstat' unumgänglich. In dieser Studie wurde daher im weiteren Verlauf nur mehr mit 'spatstat' gearbeitet. Die konkreten punktfeldstatistischen Verfahren werden zusammen mit ihrer Interpretation in einem eigenen Teilabschnitt vorgestellt (s. u. 2.1.4.2.).

Bisher wurde zwar erläutert, warum man *repräsentative Punkte* braucht, und was man mit ihnen außer der Triangulation und der Tessellierung noch anstellen kann, aber wie werden sie denn nun ausgewählt? Zunächst ist zu klären, was die gewählten Punkte repräsentativ für die jeweiligen Schächte macht. Dabei ist noch einmal auf den Beginn des Teilkapitels zurückzukommen (s. o. 2.1.). Da die Schächte senkrecht nach unten getrieben wurden, entspricht der Mittelpunkt eines Schachtumrisses im Planum mehr oder weniger genau dem Mittelpunkt des Schachtes zu Beginn einer Bergbauaktivität an der Erdoberfläche.

Ein einfacher, aber hochgradig problematischer Weg wäre die Ermittlung dieser Punkte mit Hilfe von GIS-Software gewesen. Hier wird oftmals die Möglichkeit geboten, den Schwerpunkt (Zentroiden) eines flächigen Objekts mittels Abfragefunktionen zu bestimmen. Die folgenden Überlegungen werden zeigen, dass wegen quellenkritischer Bedenken auf diesen Weg verzichtet werden muss. Beim Bergwerk Jablines war ein ähnliches Vorgehen möglich, da die Befunde in Kreidekalke gehauen sind (BOSTYN/LANCHON 1992). Diese Wände waren weitgehend stabil, und deshalb ist dort der Mittelpunkt eines Schachtes im Planum derselbe wie vor knapp 6000 Jahren. Bostyn und Lanchon verfahren denn auch auf diese Weise (dies. 1992, 90f.) und benutzen den Mittelpunkt ihrer beinahe kreisrunden Schächte.

In Arnhofen sprechen allerdings triftige Gründe gegen dieses Vorgehen bei der *Mittelpunktssuche*. Die in den Plana dokumentierten Umriss der Schächte geben den Zustand der Schachtstöße (=Wände) *nach* der Verfüllung wieder. Die Wände bestehen nur aus Kies und Sand. Es ist aber davon auszugehen, dass bei der Einfüllung der in den Schacht hinuntergeworfene Versatz an diese Wände stieß und sie dabei beschädigte (vgl. u. 2.1.5.). In Abhängigkeit von der Richtung und der beim Hinunterwerfen aufgewendeten Kraft dürften vor allem die Schottergerölle die Wände durch Anschlagen und Abreiben beim Herunterrutschen z. T. stark beschädigt haben (s. u. 2.1.5. Abb. 2.23 und 2.25). Solche Beschädigungen veränderten also die ursprünglich rundlichen Querschnitte so weit, dass sie im Planum Ausbuchtungen und Nischen zeigen (**Abb. 2.10**). Und dieser letzte (!) Zustand der Schächte wurde im Plan dokumentiert. Am stärksten sind von dieser Veränderung wahrscheinlich die Partien um den Schachtmund betroffen, da aufgrund der fragilen Beschaffenheit der Schachtwände Beschädigungen, die in größerer Tiefe auftraten, zum Nachbrechen der weiter oben gelegenen Abschnitte geführt haben dürften.

Wenn man bei einer solchen Quellenlage die *geometrischen Schwerpunkte* der Objekte in den Plana als Schachtmittelpunkte auswählt und mittels GIS berechnet, steht man vor einem Problem. Je nach Beschädigungen der Schachtwände würde eine automatische Schwerpunktsermittlung zu Punkten führen, die mehr oder weniger stark exzentrisch zum sonstigen Verlauf der Schachtwände liegen. Der berechnete und der plausiblerweise zu vermutende Mittelpunkt wären nicht identisch. Man würde also für die weiteren Berechnungen nicht die bestmögliche Annäherung an die prähistorische Schachtverteilung benutzen.

Aus archäologischen Gründen ist deshalb ein anderes Verfahren bei der Setzung der *Schachtmittelpunkte* zu wählen. Diese Ausführungen zeigen, dass selbst bei GIS-Anwendungen ein automatisiertes Verfahren aus Sicht der Archäologie nicht immer der sinnvollste Weg ist.

Der hier eingeschlagene Weg stützt sich deshalb auch auf *archäologische Plausibilität* anstatt auf vermeintliche mathematische Objektivität. Per Hand wurde mit einem EDV-Zeichensinstrument ein Kreis so in den Schachtumriß eingepasst, dass nach Augenschein der größte Teil der Kreislinie deckungsgleich zu den regelmäßig gerundeten Partien des Schachtstoßes lag. Der Mittelpunkt dieses Kreises, der wiederum mit einem elektronischen Zeichensinstrument ermittelt wurde, bildet den gesuchten repräsentativen Schachtmittelpunkt. Dieses Vorgehen erzeugt zwar Punkte, die bis einem Dezimeter und mehr von den rechnerisch ermittelten Umrisschwerpunkten abweichen können – nicht müssen. Nach den quellenkritischen archäologischen Überlegungen zur Art der im Planum erfassten Umrisse ist dieses Verfahren trotzdem das angemessenere zur Erfassung eines repräsentativen Schachtmittelpunktes.

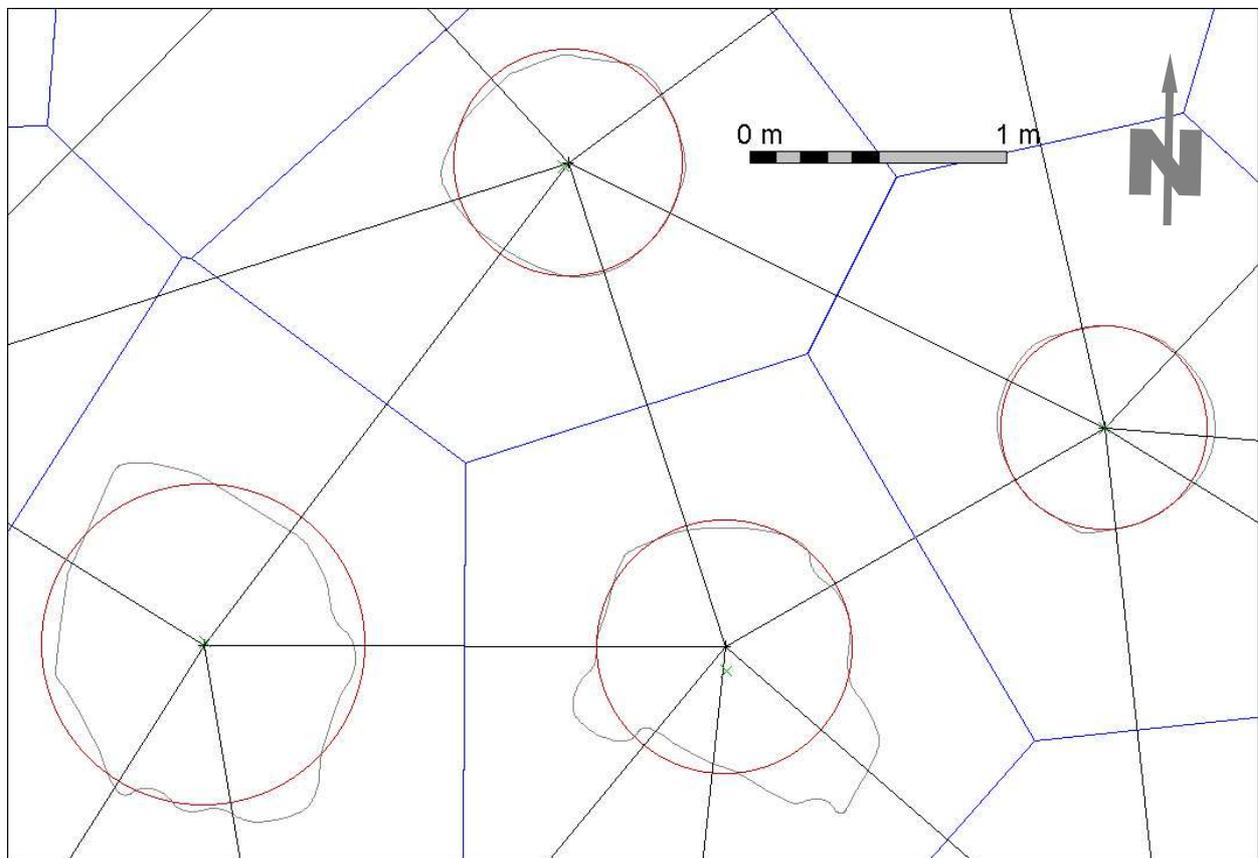


Abb. 2.10: Abensberg-Arnhofen. Vorgehen bei der Erzeugung der archäologisch repräsentativen Schachtmittelpunkte (vgl. Text).

Die roten Kreise sind dem Verlauf der regelmäßig gerundeten Stoßpartien angenähert. Ihre Mittelpunkte (Treffpunkte der Triangulationslinien) stimmen häufig mit dem jeweiligen Schwerpunkt (grüne Kreuze) des Schachtumrisses im Planum überein. Im Fall unregelmäßiger, bei der Verfüllung ausgeschlagener, Schachtwände erfüllt der Kreismittelpunkt eher die Prämisse, den Mittelpunkt des Schachtes an der ehemaligen Oberfläche zu repräsentieren, als der Schwerpunkt des Umrisses (Schacht unten rechts). Die so ermittelten Punkte bilden die Datengrundlage für Triangulation (schwarze Linien), Tessellierung (blaue Linien) und Punktfeldstatistik.

Aus den regelmäßig gerundeten Partien der Schachtstöße kann der Mittelpunkt der ehemals meist kreisrunden und beinahe senkrechten Schächte noch am besten hergeleitet werden. Es erscheint daher gerechtfertigt, diese Stoßpartien als Ausgang für die Erstellung der Datenpunkte zu wählen. Eine Automatisierung dieses Weges hätte fortgeschrittene Programmierkenntnisse und einen großen zusätzlichen Arbeitsaufwand bei einem geringen Zuwachs an Objektivität erfordert. Daher wurde darauf verzichtet und der beschriebene manuelle Weg gewählt.

Die *Umsetzung* dieses Vorgehens war bei der Halde problematischer als bei der Kiesgrube. In der Halde dürften die Befundumrisse stärker von Beschädigungen beim Zuschütten betroffen gewesen sein. Die Befundgrenzen verliefen hier wesentlich unregelmäßiger. Außerdem ließen sie sich selten so eindeutig abgrenzen, wie auf den Plana in der Kiesgrube (s. o. 2.1.1.). Die schlechte Erkennbarkeit der Umrise geht wahrscheinlich darauf zurück, dass hier Anstehendes und Befundverfüllung von fast gleicher Farbe, Körnigkeit und Konsistenz waren. Bei beidem handelte es sich um hellrostbraune Kiese und Sande. Die Kreise, aus denen die Schachtmittelpunkte abgeleitet werden sollten, wurden nun an solche Umrise angepasst. Die Mittelpunktssetzung für die Halde dürfte daher etwas unschärfer sein, als die der Kiesgrube. Diese geringere Präzision in der Halde ist bei allen folgenden Auswertungen und Vergleichen stets zu berücksichtigen. Es wird nicht mehr extra darauf hingewiesen.

Es sei noch einmal betont: Die gesamte weitere Auswertung der Schachtverteilung basiert auf der räumlichen Verteilung der so gesetzten Schachtmittelpunkte. *Die Auswertung der Schachtverteilung beruht also nicht auf den Schachtumrissen, sondern auf einer Anordnung von Punkten in einer zweidimensionalen Ebene, von denen angenommen wird, sie seien repräsentativ für die Lage des Schachtes, über den sie räumlich definiert wurden.*

Steht man dieser *Datenreduktion* eines flächigen Objekts auf einen Punkt grundsätzlich kritisch gegenüber, bleibt als Alternative nur der Versuch, diejenigen Methodenvarianten anzuwenden, bei denen die Schächte als flächige Objekte betrachtet werden. Solange solche Ansätze aber in den gängigen GIS-Systemen nicht oder nur ungenügend implementiert sind, müsste man dafür zu programmierbarer geostatistischer Software greifen oder einzelne Methoden (Tesselierung) mittels Rasterkarten nachbilden, die komplizierte Berechnungs- und Analyseschritte erfordern. In Anlehnung an gängige geographische Praxis und aufgrund fehlender Programmierkenntnisse wurde darauf verzichtet, und der leichter nachvollziehbare Weg über die Reduktion auf Punktobjekte gewählt.

Wenn im Weiteren Planungsmuster gesucht werden, ist stets zu beachten, dass sich die Lage der hier verwendeten Schachtmittelpunkte und ihre einstmals beabsichtigte Position durch eine ganze Reihe *möglicher Fehler* unterscheiden können.

Diese möglichen – nicht zwingend existenten (!) – Fehler teilen sich in *zwei Fehlerarten* auf. Da man nach der neolithischen Planung sucht, fallen hier bereits alle Fehler ins Gewicht, die die Neolithiker beim Vermessen machten. Die *‘neolithischen Fehler‘* sind also die eine Fehlerart. Der erste Fehler aus dieser Gruppe betrifft den Unterschied zwischen Geplantem und Umgesetztem. Die oben bereits diskutierte Problematik der Schachtlokalisierung anhand von Trichtermulden in der Halde bzw. die Lokalisierung von Vorgängerschächten war also die erste Fehlerquelle der Neolithiker beim Umsetzen von Planung in Handlung. Hier kann bereits eine beträchtliche Fehlermarge auftreten. Aber auch einfache Messfehler konnten zu Unterschieden zwischen dem geplanten Konzept und seiner Umsetzung führen. Ihr Einfluss dürfte aber wesentlich geringer sein als der der ersten Fehlerquelle.

Die zweite Fehlerart könnte man auch als *‘moderne Fehler‘* bezeichnen. Dabei ist vor allem die Auswahl des Schachtmittelpunktes zu nennen. Mehrere Fehlerquellen können die Bestimmung dieses Punktes verzerren. Der Punkt ist wie gesagt eine Rekonstruktion und muss aus dem Umriss eines Schachtes in z. T. mehreren Metern Tiefe nachträglich abgeleitet werden. Hier können sich Verzerrungen einschleichen. Aber schon zuvor sind Fehler möglich. Zunächst müssen die Schächte ja archäologisch eingemessen werden. Der Verlauf eines kurvilinearen Befundumrisses auf einem Tachymeterplan ist selbst bereits Ergebnis einer interpolierten Linie (*‘splines‘*) zwischen den angemessenen Punkten. Auch dabei können, in Abhängigkeit von der Anzahl dieser Punkte, kleinere Unterschiede der Befundgrenze zwischen realem Verlauf und Tachymeterplan auftreten. Schließlich kann noch beim Setzen der Mittelpunkte anhand der manuell eingefügten Kreise ein weiterer kleiner Fehler hinzutreten.

Alle diese Fehler *können* auftreten, sie müssen es aber nicht. Es handelt sich also um mögliche, und nicht um bereits vorhandene Fehler. Da zumindest die ersten drei Fehlerarten untereinander und von den anderen beiden unabhängig sind, dürften diese Zufallsverhältnisse in der Regel ein Aufsummieren der einzelnen Fehler verhindern. Als Effekt erhöht sich lediglich die Unschärfe der Untersuchungsergebnisse. Fehler durch ungenau interpolierte Befundgrenzen erreichen kaum Größen, die sich unangenehm bemerkbar machen. Allerdings addieren sich ihre Effekte mit denen der letzten Fehlerquelle, dem manuellen Setzen der Mittelpunkte, auf. Im Einzelfall könnten sich also die Fehler bis zu etwa einem Dezimeter aufsummieren. In der Regel ist dies jedoch kaum zu erwarten. Es dürfte eher zu Unschärfen im Bereich von etwa fünf bis zehn Zentimetern kommen.

Eine Grundsatzkritik der im Rest des Teilkapitels vorgestellten Resultate könnte sich also auf das Problem der Punktauswahl, ihrer Repräsentativität und der möglichen Fehlermargen stützen.

Allerdings müsste man dann beweisen, dass die jeweiligen Kernaussagen aufgrund dieser Problematik unzutreffend werden. Kritiker könnten dies überprüfen, indem sie mit entsprechenden punktfeldstatistischen Verfahren eine Anzahl von Simulationen analysieren, bei denen man jeweils die Punkte nach entsprechenden Fehlerparametern leicht um die hier verwendeten Koordinaten streuen lässt. Für derartige Kontrollen empfiehlt der Autor wiederum den Rückgriff auf die statistische Programmieroberfläche R, da hier solche Simulationen schnell und angemessen ausgeführt werden können.

Nachdem die Schachtmittelpunkte einmal gesetzt sind, lassen sich *Tesselierung und Triangulation* zügig im GIS umsetzen. Die Triangulation wurde im vorliegenden Fall allerdings mit der Software ‘SAS’ durchgeführt und das Ergebnis im GIS nachdigitalisiert. Sowohl Tesselierung als auch Triangulation erfolgten getrennt für die beiden Teilflächen “Kiesgrube“ und “Halde“. Das Ergebnis der Triangulation wurde mit dem Programm ‘ArchaeoCAD’ weiterbearbeitet und in der GIS-Software ‘MapInfo’ ausgewertet. Die Tesselierung dagegen wird als einfache Prozedur in ‘MapInfo’ angeboten. Die Erzeugung der Thiessenpolygone erforderte daher keine weiteren Bearbeitungsschritte. Für die Punktfeldstatistik wurden die Koordinaten der Schachtmittelpunkte und die Vertices der Polylinie ‘Grabungsgrenze’ aus ‘MapInfo’ exportiert und im Modul ‘spatstat’ für ‘R’ ausgewertet – jeweils getrennt für die Flächen Kiesgrube und Halde.

Das Ergebnis der *Triangulation* für die Schächte der *Kiesgrube* wurde vor der weiteren Bearbeitung verändert. Alle randlich verlaufenden Linien, die deutlich länger sind, als die nächsten, weiter innen liegenden Linien, waren zu entfernen (**Abb. 2.11**). Nur nach Süden, zur Bergwerksgrenze hin, werden am Rand gelegene Linien als nicht-artifizial betrachtet und daher beibehalten.

Insgesamt wurden durch die Triangulation 626 Linien für 227 Punktobjekte gezogen. Die Dichte der Schächte pro Ar liegt – mit der Hand für verschiedene Varianten anhand der Mittelpunkte ausgezählt – bei etwa 25 bis 30 Schächten. Unmittelbar am Bergwerksrand erreicht sie dagegen nur Werte von 11 bis 15 Befunden pro Ar.

Ein erster Überblick bestätigt graphisch die nach dem Blick auf den Plan bereits intuitiv zu vermutenden *linearen Strukturen*. Er zeigt aber noch mehr. Das Netz der mit Linien verbundenen direkten Nachbarn besitzt teilweise eine höchst erstaunliche Regelmäßigkeit. Diese legt nahe, dass die einzelnen Linien bzw. die so verbundenen Nachbarn in unterschiedlicher Weise Bezug aufeinander nehmen. Aber auch als Ergebnis einer Schachtanlageregel, die rein bergbautechnisch bedingt ist, könnten regelhafte Muster entstehen.

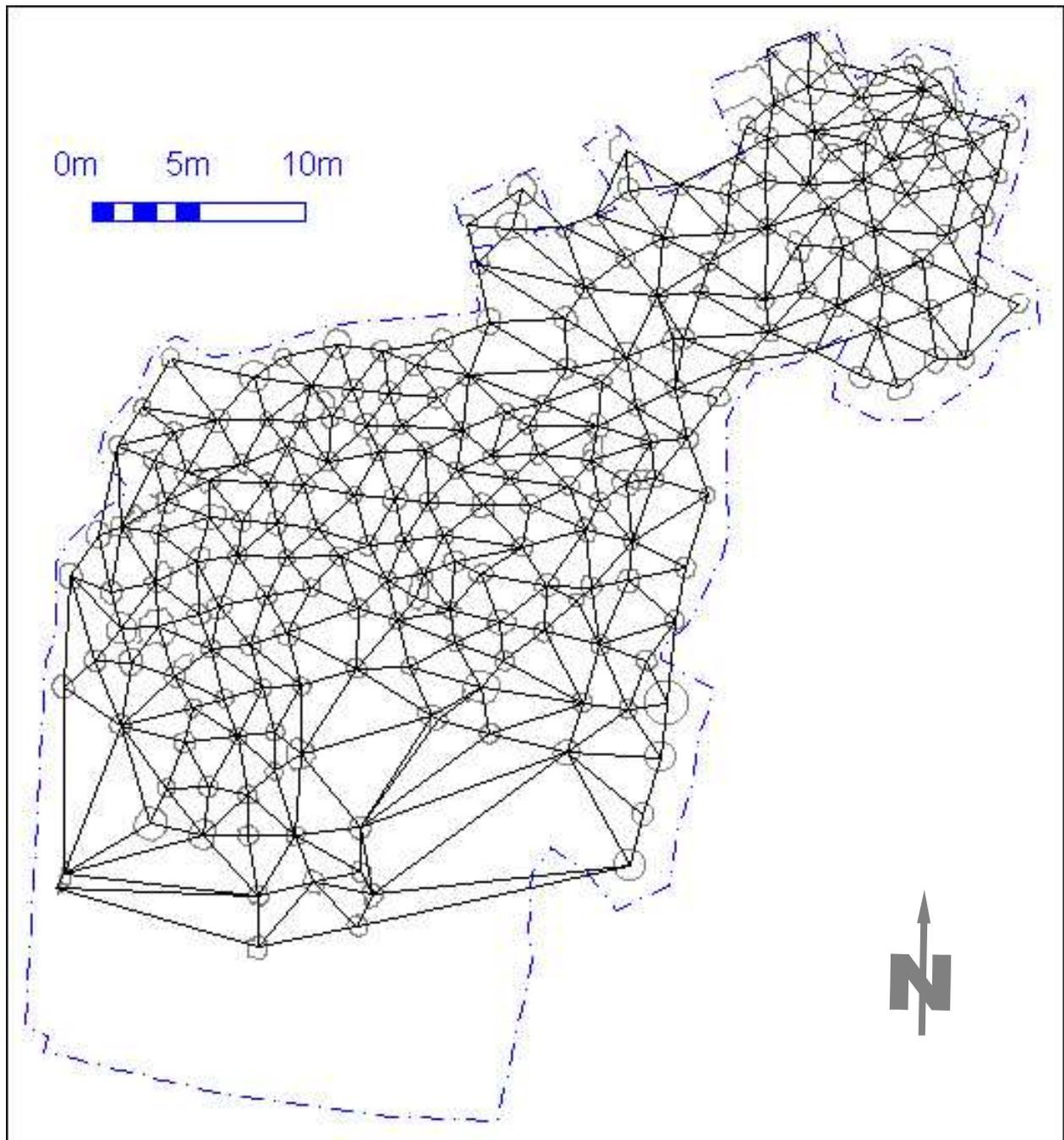


Abb. 2.11: Abensberg-Arnhofen. Triangulation (schwarze Linien) der Schächte (graue Konturen) in der Kiesgrube. Die blaue Strichpunktlinie ist die Grenze des idealisierten Planes.

Demnach würde alleine das ständige und wiederholte Einhalten eines bestimmten Abstandes zu einer scheinbar regelhaften Verteilung führen (vgl. STOYAN/STOYAN 1992, 231).

Dafür sind zwei einander entgegengesetzte Prinzipien vorstellbar: einerseits das *Sicherheitsbedürfnis*, andererseits die angestrebte *Rohmaterialausbeute*. Trotz ihrer Verfüllung erzeugen auch aufgegebene Schächte einen Stabilitätsverlust des umgebenden Gebirges – das ist die Bergmannsbezeichnung des Untergrundes.

Die Verfüllung ist, obwohl zumeist von völlig gleichartiger Konsistenz wie das Anstehende, zunächst noch nicht wieder in gleichem Maße verdichtet. Auch besitzt sie nicht mehr die gleiche Lagerung und Schichtung wie das restliche Gebirge. Geriet man mit einem neuen Schacht zu nahe an einen alten, dann wuchs die Gefahr, dass die Wand zwischen beiden in den neuen Schacht stürzte, da sie dann bereits auf zwei Seiten aus dem natürlichen Verband gelöst war. A priori kann daher angenommen werden, dass, wenn die neolithischen Bergleute keine Fehler machten, aus Sicherheitsgründen also stets ein Mindestabstand zwischen zwei Schächten auftreten sollte.

Die Größe des *Sicherheits-Mindestabstandes* kann durch eine einfache statistische Auswertung der Triangulationsstreckenlängen erforscht werden. Die verschiedenen Punktfeldstatistiken bieten hier aber weit verlässlichere und detailgenauere Instrumente (s. u. 2.1.4.).

In entgegengesetzter Weise wirkt eine angestrebte Optimierung der *Rohmaterialausbeute* für eine bestimmte Fläche. Da die Weitungen der Duckelbaue in der Regel lediglich wenige Dezimeter in den Berg getrieben wurden, konnte das Flöz nur optimal ausgebeutet werden, wenn man mit einem neuem Schacht möglichst nahe an die alten heranrückte.

Diese beiden *Faktoren* – möglichst nahe beieinander bei gleichzeitiger Wahrung des notwendigen Mindestabstandes – hätten, wären sie stets zur Anwendung gekommen, zu einem äußerst regelmäßigen Liniennetz geführt. Das ist aber nicht der Fall, denn innerhalb der regelhaften Bereiche ist bereits mit bloßem Auge zu erkennen, dass die Abstände zwischen den direkten Nachbarn in unterschiedlicher (!) Weise schwanken. Das entscheidende Argument gegen einen Prozess, der zwar regelhaft aber doch ohne weitere Planungselemente ablief, bilden aber die unregelmäßigen Bereiche zwischen den regelhaft verteilten Schächten. Hier kommen sich die Nachbarn viel zu nahe oder sind unnötig weit voneinander entfernt. Solche Bereiche dürften bei einer Verursachung der Regelmäßigkeit durch die genannten Faktoren überhaupt nicht auftauchen, außer man unterstellt den neolithischen Bergleuten einen ungenauen Umgang mit den Sicherheitsregeln. Aber auch dann lieferten die Bereiche, in denen die Ungenauigkeiten aufträten, wiederum Anhaltspunkte für eine Unterteilung in regelmäßigeren und unregelmäßigeren Areale.

In jedem Fall stellen also diese Stauchungen und Zerrungen im Netz der Triangulationslinien erste Anhaltspunkte für eine *Unterteilung* der Schächte in Gruppen dar. So kann ohne weitere Analyseschritte schon jetzt die Hypothese abgelehnt werden, allein bergbautechnische Ansprüche hätten zu der erkennbaren Regelmäßigkeit geführt.

Auch der Blick auf die *Thiessenpolygone* lässt bereits ohne eine statistische Auswertung große Bereiche mit regelhaft kleinen Flächen erkennen, in die immer wieder kleinste oder größere Einheiten untergemischt sind (**Abb. 2.12**).

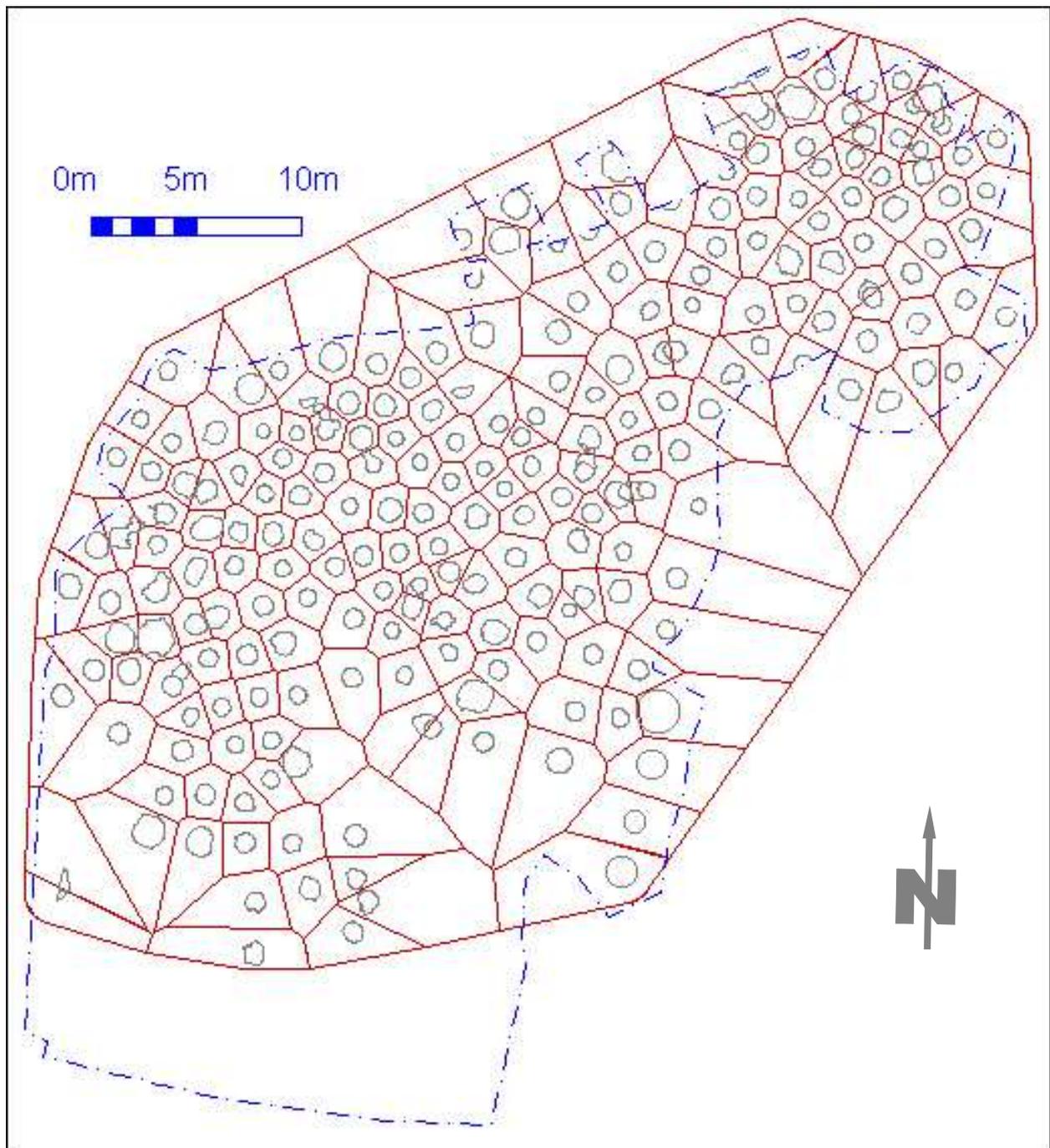


Abb. 2.12: Abensberg-Arnhofen. Thiessenpolygone (rote Linien) um die Schächte (graue Konturen) in der Kiesgrube. Die blaue Strichpunktlinie ist die Grenze des idealisierten Planes.

Randlich gelegene Polygone sind in jedem Fall vom Problem der Verzerrung im Randbereich beeinflusst. Der unregelmäßige Verlauf der Untersuchungsgrenze wirkt sich hier so aus, dass keine weitere Auswertung der betroffenen Flächen möglich ist. Die großen Thiessenpolygone am Südrand des Bergwerks sind dagegen ernst zu nehmende Befunde.

Die inneren Bereiche dieser Untersuchungsfläche ähneln mit ihren annähernd gleich großen Polygonen beinahe dem Aussehen von Bienenwaben. Dies ist als Phänomen zu betrachten, das von den Abständen zwischen den Nachbarn (Triangulationslinien) abhängig ist. Einheitliche, sechseckige Thiessenpolygone entstehen in Bereichen, in denen alle benachbarten Schächte annähernd gleich weit vom Schacht im Mittelpunkt des regelmäßigen Polygons entfernt sind. Für Schätzungen zum Flächenverbrauch von einzelnen Schächten oder möglichen Gruppen kommen vor allem diese Flächen in Frage. Polygone, die sich am Rand des Bergwerks bzw. der Untersuchungsfläche befinden, sind nicht dafür geeignet. Hier liegt mit dem Aussetzen bzw. Abtauchen des Flözes quasi eine Ausnahmesituation für den Bergbau vor bzw. die Polygongröße ist von Schätzparametern der Methode zu stark beeinflusst, um als Annäherung an den prähistorischen Flächenverbrauch zu fungieren.

Die Untersuchungsfläche *Halde* ist an allen Seiten vom Bergwerk umgeben. Hier mussten alle außen liegenden *Triangulationslinien* entfernt werden, da in diesen Fällen von näher benachbarten Schächten im nicht ausgegrabenen Bereich ausgegangen werden muss (**Abb. 2.13**).

Auf dieser Fläche verbindet die Delauney-Triangulation 153 Punktobjekte mit 475 Linien. Hier, im Bergwerksinneren, ist die Schachtdichte extrem hoch. Sie liegt regelhaft bei über 30 Schächten pro Ar (33,3 /Ar). Mit dieser hohen Dichte ist ein wesentlich unregelmäßigeres Triangulationsstreckennetz verbunden. Der Grund für diesen Unterschied dürfte in den Abbaubedingungen liegen, die auf diesem Areal vorteilhafter ausfielen, als in der Kiesgrube. Bei den in den Jahren 2002 und 2003 fortgeführten Grabungen^{2,6} stellte sich heraus, dass die Flöztiefe fast im gesamten Bereich der Haldengrabung regelhaft bei nur maximal etwa 4 m liegt. Dies führte offensichtlich zu einer anderen Schachtverteilung als in der Kiesgrube. Zugleich ist nochmals auf die problematische Befundsituation hinzuweisen (s. o.).

Eine Modellvorstellung für die *größere Unregelmäßigkeit* sei im Folgenden erläutert. Grundannahme ist, dass man aus Opportunitätsgründen längere Zeit nach dem Ausbeuten eines Areals dorthin zurückkehrte, um dessen Vorzüge noch einmal zu nutzen. Nachdem eine erste Abbauphase abgeschlossen war, die in ihrer Regelmäßigkeit der "Kiesgrube" ähnelte, kam man später noch einmal zurück und nutzte jede erdenkliche Lücke zwischen den bereits bestehenden Schächten für weitere Bergbauaktivitäten. Dies ist gut an den teilweise extrem geringen Abständen zu erkennen, die auf mangelndes Wissen um die Lage der Vorgängerschächte hinweisen.

^{2,6} Ich danke der Kreisarchäologie Kelheim (PD Dr. Michael-Maria Rind und Hrn. Klaus Eisele) für die Informationen zu ihren Aktivitäten in Arnhofen nach Abschluss des DFG-Projektes.

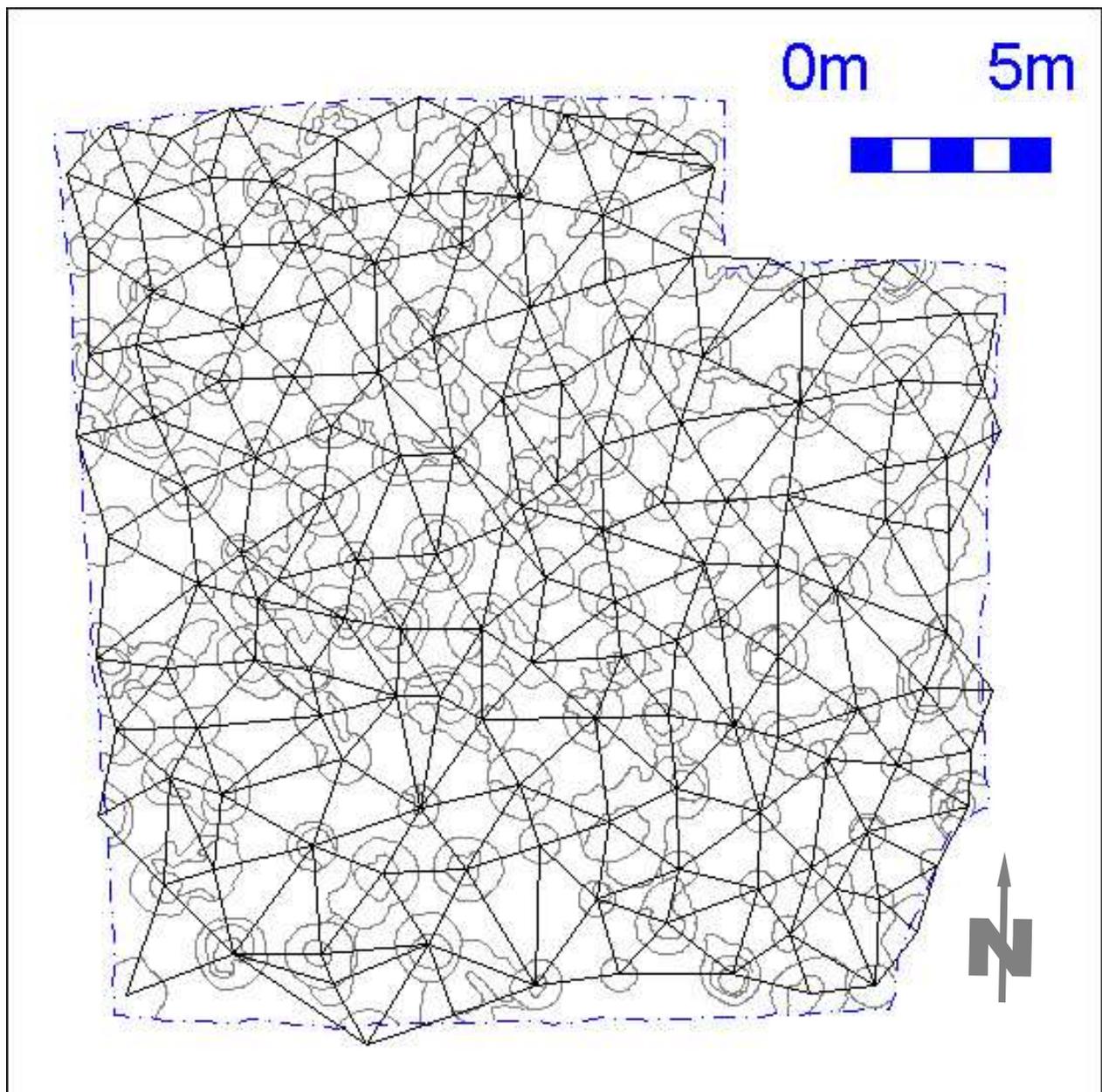


Abb. 2.13: Abensberg-Arnhofen. Triangulation (schwarze Linien) der Schächte (graue Konturen) in der Haldengrabung. Die blaue Strichpunktlinie ist die Grenze des idealisierten Planes.

Wenn sich, wie hier zu vermuten, mehrere Muster überlagern, wird die Methode Triangulation weitgehend *blind für das einzelne Abbaumuster*. Eine derartige Situation führt nämlich dazu, dass zahlreiche Linien und Bezüge zwischen Schächten derselben Abbauphase nicht mehr erfasst werden. Das Anlegen weiterer Schächte in den Sicherheitsabständen der ersten Abbauphase verwischt die klaren Bezüge zwischen direkten Nachbarn. Die Triangulation kann aber nur Regelmäßigkeiten zwischen direkten Nachbarn darstellen. Gerade diese Nachbarschaft wurde hier vermutlich immer wieder durch weitere Schächte gestört.

Die später angelegten Schächte kann man sich auch in der Art eines gleichzeitig vom Zufall wie von Regeln gesteuerten, störenden Eingriffes in ein bis dahin weitgehend regelmäßiges Muster vorstellen. Zufällig, weil jeweils noch ein freier Platz gefunden werden musste; regelhaft, weil wohl selbst dann noch gewisse Sicherheitsmargen zu beachten waren. Wenn eine solche Störung eines regelmäßigen Musters immer weiter zunimmt, führt dies schließlich zum Verschwinden des Musters und zu einer vermeintlich zufallsbedingten Verteilung (HODDER/ORTON 1976, 54). Eine derartige Größenordnung erreichte die Störung aber nicht (s.u. 2.1.4.). Der Grund dafür dürfte gewesen sein, dass man mit einem neuen Schacht nicht beliebig nah an einen schon bestehenden heranrücken konnte. Nur Freiflächen, die man für ausreichend groß hielt, waren noch zur Schachtanlage geeignet. Die Störungen gehorchten also selbst wieder Regeln (vgl. u. 2.1.4.2.), wenn auch nicht so anspruchsvollen wie bisher.

Indirekt belegt dieser Sachverhalt, dass das bereits bestehende regelhafte Muster den Ausdruck einer Flächennutzung darstellt, die beinahe optimal an die Situation angepasst war, denn es bot nur noch wenig Platz für spätere Störungen durch nachträglich niedergebrachte Schächte.

Die hohe Schachtdichte ergibt bei der *Tesselierung* auf dem *Haldenareal* sehr kleine "Schachtfelder" (**Abb. 2.14**). Die regelmäßige Grenze des Untersuchungsraumes führt zu dem positiven Nebeneffekt, dass die randlich gelegenen Polygone durch die Kappung an dieser Grenze ihren innen liegenden Nachbarn wesentlich ähnlicher sind, als dies in der "Kiesgrube" der Fall war. Allerdings treten kaum die dort häufigen Polygone in Form einer Bienenwabe auf. Das deutet auf eine wesentlich unregelmäßigere Schachtverteilung auf dem Haldenareal hin. Es kommen auch immer wieder langgestreckte, nebeneinander liegende schmale Thiessenpolygone vor. Sie weisen genauso wie das Muster der Triangulationslinien darauf hin, dass hier zum Teil später Schächte zusätzlich zwischen ein vorhandenes Muster "gequetscht" wurden. Man kann dies archäologisch leicht nachvollziehen: Solche langgestreckten Polygone liegen häufig dort, wo sich zwei oder mehrere Schächte schneiden. Bei den späteren Aktivitäten musste es aber nicht unbedingt zu Überschneidungen kommen. Manchmal wurde ein Schacht auch etwas lockerer zwischen vorhandene gezwängt. Aber auch dann ergeben sich die langgestreckten Thiessenpolygone. Die Methode reagiert also auch auf Störungen, die rein archäologisch nicht erkennbar sind.

Diese ersten *Ergebnisse von Triangulation und Tesselierung* machen deutlich, dass die Annahme, nur sicherheitstechnische Erwägungen hätten die regelhaften Schachtverteilungen verursacht, nicht zutrifft. Würde man aber bereits jetzt schon Schächte mittels rein arbiträrem Aneinanderreihen zu Gruppen zusammenzufassen, hieße dies, die von den geographisch-statistischen Methoden gebotenen objektiven Auswertungsmöglichkeiten zu verschenken.

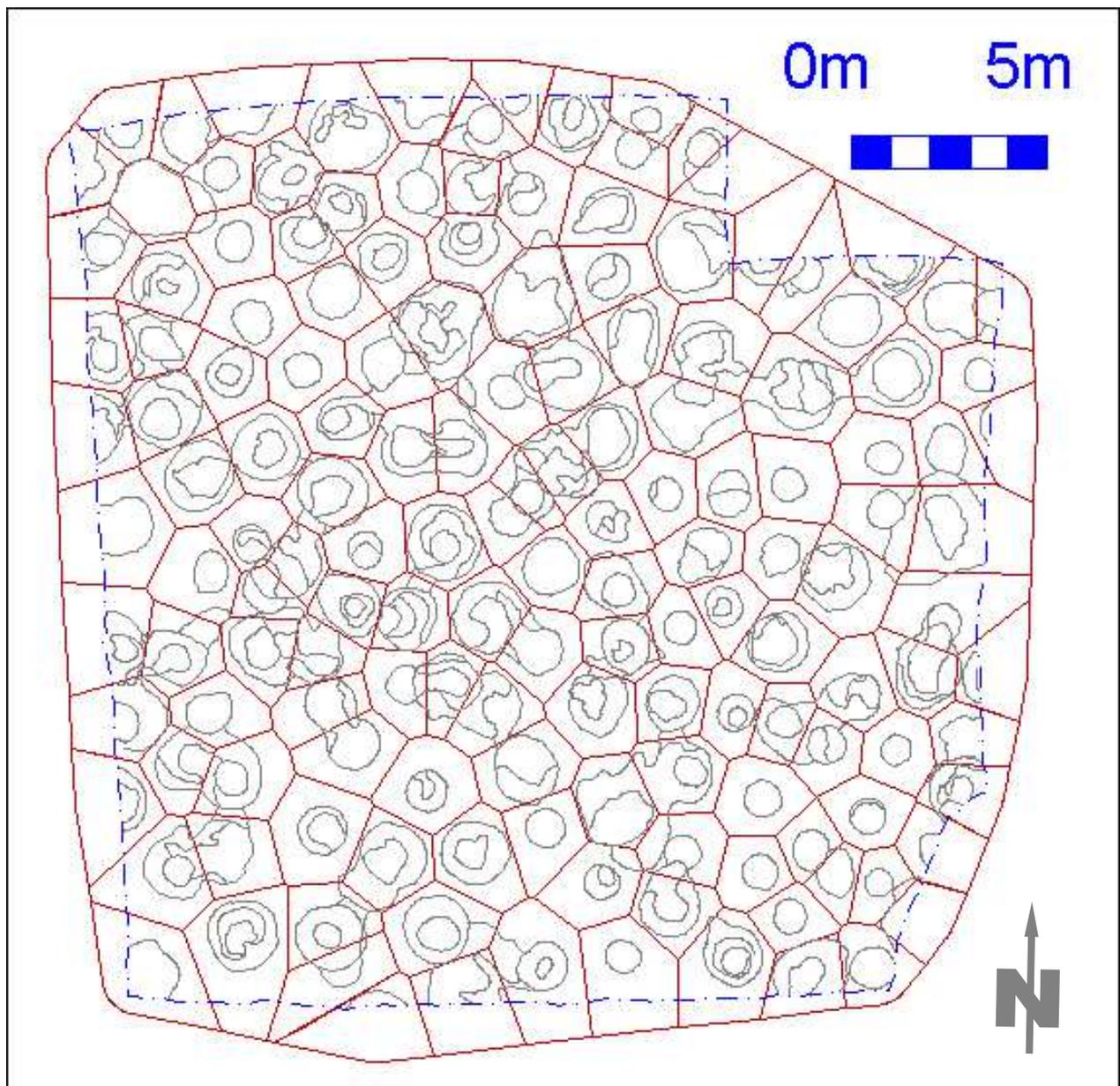


Abb. 2.14: Abensberg-Arnhofen. Thiessenpolygone (rote Linien) um die Schächte (graue Konturen) in der Haldengrabung. Die blaue Strichpunktlinie ist die Grenze des idealisierten Planes.

Zudem sind *Modelle* zu postulieren, mit denen man die reichlich zur Verfügung stehenden Daten im Sinne der Fragestellung nutzbar machen kann. Es bedarf nachvollziehbarer Prämissen dafür, wann Schächte bei ihrer Anlage Bezug zueinander nahmen und daher – aus archäologischer Sicht – als zeitgleich bzw. zeitnah gelten dürften. Dafür wurde im Weiteren ein gestaffeltes Vorgehen gewählt. Zunächst kommen anspruchsvollere geostochastische Methoden zur Analyse der Schachtverteilung zum Einsatz (2.1.4.).

Im Anschluss wird erläutert, wie man ausgehend von Triangulation und Tesselierung aus den bisherigen Resultaten eine Modellbildung der Abbauorganisation entwickeln kann. Diese sollte nachvollziehbare und methodisch kritisierbare Antworten auf die Frage nach der Bergbauorganisation liefern (2.1.5.). Anschließend wird diese Modellbildung für die beiden Teilflächen umgesetzt (2.1.6. und 2.1.7.).

2.1.4. Analyse der Schachtverteilung

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methoden erlauben es, die Eigenschaften der Schachtverteilungen in Form von Messwertverteilungen zu untersuchen. Daraus ergibt sich eine objektive Beschreibung der Verteilungsart und ein nachvollziehbarer Ausgangspunkt für die Suche nach den kausalen Faktoren. Aufgabe der archäologischen Interpretation ist dann die Suche nach menschlichen Handlungsmustern, die hinter diesen Faktoren stehen könnten.

Zu Anfang dieses Abschnittes werden zunächst grundlegende Fragen zur Art der Schachtverteilung geklärt (2.1.4.1.). Danach kommen punktfeldstatistische Methoden zur Anwendung (2.1.4.2.). Der letzte Teilabschnitt beschäftigt sich mit der Analyse der Triangulationslinienlänge (2.1.4.3.).

Bei der Lektüre der folgenden Abschnitte ist auf eine Verwechslungsgefahr hinzuweisen. Bei der Datengrundlage für die Auswertung handelt es sich um zwei *Arten von Verteilungen*, eine univariate und eine bivariate bzw. räumliche.

Einmal geht es um den aus der Statistik gewohnten Fall einer Variablen, deren Ausprägung bei jedem untersuchten Objekt gemessen wurde – also eine univariate Auswertung. Daneben wird mit der Lage der Schachtmittelpunkte im zweidimensionalen Raum eine bivariate Verteilung ausgewertet – die X- und die Y-Koordinaten sind die zwei Variablen. Eine Verteilung der ersten Art erzeugt man beispielsweise indem man die Länge aller Triangulationslinien misst und die Gesamtheit der Messungen anschließend mittels bestimmter Kennwerte wie etwa dem Mittelwert charakterisiert. Die bivariate Punktverteilung ist als räumliches Phänomen allerdings ein Ausnahmefall: Für solche Verteilungen gibt es spezielle Auswertungsmethoden. Dabei handelt es sich um ein Paket von Methoden aus der im Deutschen als Punktfeldstatistik bezeichneten stochastischen Geometrie. Neben den Koordinaten der Punkte werden die Koordinaten der Untersuchungsflächenbegrenzung benötigt.

Um univariate Auswertungen handelt es sich bei den Unterabschnitten 2.1.4.1. und 2.1.4.3. Die Punktfeldstatistik wird in 2.1.4.2. behandelt.

Man beachte, dass nur im folgenden Abschnitt 2.1.4. die Bezeichnungen Punkt, Schacht und Objekt *synonym* verwandt werden.

2.1.4.1. Art der Schachtverteilung

Zunächst gilt es, die wichtigste Eigenschaft der Verteilung herauszufinden: Sind die Schächte zusammengedrängt, regelmäßig oder zufällig verteilt. Man kann damit den Einwand überprüfen, es könne sich bei der Regelmäßigkeit der Schachtverteilung, die bisher nur intuitiv aus der Triangulation abgeleitet wurde, doch um Zufall handeln. Eine vom Menschen als Ganzes planvoll gestaltete räumliche Verteilung sollte sich deutlich vom Zufall unterscheiden. Planende Gestaltung zeichnet sich durch Regelmäßigkeit aus, spontane Nutzung durch Unregelmäßigkeit (LIENAU 1986, 84). Grundsätzlich gilt bei der Beschäftigung mit räumlichen Verteilungen: “[...], a pattern for which complete spatial randomness is not rejected, scarcely merits any further formal statistical analysis“ (DIGGLE 2003, 7).

Die Frage nach dem *Einfluss des Zufalls* kann man nun mit einer Reihe von Methoden untersuchen. Hier wird zunächst ein Test auf der Basis der Thiessenpolygonflächen durchgeführt. Es folgt ein Test auf der Grundlage der Abstände zwischen den nächsten Nachbarn. Die für den zweiten Test notwendigen Daten lassen sich aus der Menge der Triangulationslinien extrahieren. Bevor man die oben formulierte Frage beantworten kann, ist zunächst zu klären, wie eigentlich *Zufall bei einer zweidimensionalen Verteilung* aussieht. Was bedeutet es, wenn man von einer Punktverteilung sagt, sie sei zufällig? Zufällig ist eine räumliche Verteilung dann, wenn die Lage jedes Punktes unabhängig von der jedes anderen Punktes aus der untersuchten Punktwolke ist (DIGGLE 2003, 6; RIPLEY 1981, 13f und 130). Überraschenderweise kann selbst regelhaftes menschliches Handeln und Planen, das keinerlei andere Aktivitäten berücksichtigt außer der eigenen, schließlich zu Mustern führen, die, mathematisch gesehen, eine Zufallsverteilung sind (UPTON/FINGELTON 1985, 12). Das ist beispielsweise dann der Fall, wenn jeweils einzelne Aktivitäten ohne Rücksicht auf spätere Geschehnisse optimal platziert werden sollen: “If competing contradictory forces can cause apparent randomness, then so can competing contradictory human decisions“ (ebd.)! Im Fall der Schächte hieße dies, ihre Anlage erfolgte nach einer Abwägung, bei der nur die optimale Lage des einzelnen jeweiligen Schachtes im Vordergrund stand. Wenn also keine Regeln beachtet wurden, die in irgendeiner Weise langfristige Nutzungsaspekte einbezogen, sollte sich – trotz individueller Optimierungen – am Ende ein Zufallsmuster ergeben.

Antizipierende räumliche Planung zeichnet sich dem entgegen dadurch aus, dass die Lage eines Objektes abhängig von der Lage anderer Objekte ist. Mit anderen Worten, die Entscheidungen, die schließlich die Handlungen bestimmen, bauen aufeinander auf.

Bei einer Planung kann man von einer *einfachen Lokalisierungsstrategie* sprechen, wenn nur die zu platzierenden Objekte und die gegebene Fläche eine Rolle spielen. Handelt es sich um eine solche, darf man als simpelste Variante annehmen, dass bei jeder Schachtneuanlage nur die jeweils zunächst benachbarten Objekte und die noch vorhandene Fläche berücksichtigt wurden. Das Ergebnis, das man schließlich nach Abschluss der Flächennutzung vorfindet, ist das Resultat vieler, schrittweise aufeinander aufbauender einzelner Planungen, die alle gemeinsam die Restfläche berücksichtigen. In einem solchen Fall könnten sich von Planungsaktivität zu Planungsaktivität jeweils kleinere Irrtümer und Fehler einschleichen. Eine aus dieser Flächennutzung resultierende Verteilung sollte neben der zu erwartenden weitgehenden Einheitlichkeit der Gesamtverteilung an den jeweiligen Grenzen der Einzelaktivitäten schwache Verzerrungen aufweisen.

Als *komplexe Lokalisierungsstrategie* ist demgegenüber der Fall zu bezeichnen, bei dem von vornherein die Lage (zumindest eines Großteils) der zu platzierenden Objekte in Bezug auf die noch vorhandene Fläche festgelegt wird. Selbst wenn diese komplexe Planung wiederum schrittweise durch eine Reihe kleinerer Aktivitäten umgesetzt wird, müsste sich am Ende eine beinahe vollständige Einheitlichkeit zeigen.

Planungstiefe besitzt selbstverständlich keine diskreten Ausprägungen – also Varianten ohne Zwischenformen. Die hier entwickelten Arbeitsbegriffe beschreiben nur Endpunkte einer kontinuierlichen Skala der möglichen historischen Ausprägungen. Die Begriffe werden hier verwendet, um eine vereinfachte Darstellung und eine modellhafte Beschreibung zu ermöglichen. Genauso kann man sich komplexere Kombinationen und Überlagerungen dieser beiden Strategien vorstellen. Eine plausible Kombination ist beispielsweise das grobe Abstecken einer Teilfläche, die nachträglich mit kleinen Aktivitäten gefüllt wird. Da alle zu platzierenden Objekte in dieser Teilfläche liegen, ist ein Aspekt der komplexen Lokalisierung gegeben. Die Ausfüllung der Teilfläche entspricht wiederum einer Reihe einfacher Lokalisierungen.

Es bleibt festzuhalten, bei komplexeren Strategien entstehen größere Areale mit größerer Einheitlichkeit, bei einfacheren gibt es zumindest lokale Areale mit einer gewissen Regelmäßigkeit.

Wichtig ist, *bei jeder Art von Planung zeigt die Verteilung keine Zufallseinflüsse.*

Wie sehen nun die *konkreten Zufallsauswirkungen* aus, wie wirken sie sich bei den hier zur Verfügung stehenden Daten aus? Aufgrund der bei einem Zufallsprozess vorausgesetzten Unabhängigkeit zwischen der Lage einzelner Punkte schwanken die Abstände zwischen ihnen bei einer zufälligen Verteilung stark und fallen zum Teil sehr klein bzw. sehr groß aus.

Das rührt daher, dass per Definition bei der Auffüllung einer Fläche mit zufallsverteilten Punkten die jeweilige Restfläche keinen Einfluss auf die Lage der Punkte zueinander haben darf – nur auf ihre Anzahl (DIGGLE 2003, 6; RIPLEY 1981, 13f.). Die Größe der von der Verteilung bedeckten Fläche hat also bei Zufall keinen systematischen Einfluss auf den Bezug der Objekte zueinander. Aus dem Gesagten wird verständlich, warum in diesem Fall bei einer Tessellierung auch sehr große und sehr kleine Thiessenpolygone entstehen sollten. Bei den Triangulationslinien bzw. den Abständen zwischen einander zunächst benachbarter Schächte ist dies ähnlich. Der Zufall sollte auch hier zu größeren Unterschieden zwischen den einzelnen Streckenlängen führen.

Schließt man für die Schachtverteilung den Zufall aus, bedeutet das im Umkehrschluss, dass die neolithischen Bergleute nicht beliebig viel Platz zur Anlage neuer Schächte hatten, und zugleich die Lage eines Schachtes von räumlichen Konventionen abhängig war. *Die Ablehnung einer Zufallsverteilung belegt, dass es Nutzungsrechte gab, die den Bergleuten begrenzte Flächen zur Nutzung zuwies.* Oder anders gesagt, in diesem Fall kann man plausiblerweise die Existenz von Claims für einzelne Benutzergruppen annehmen.

Auch wenn man dieser Argumentation skeptisch gegenüber steht, gilt in jedem Fall: *die statistisch sichere Ablehnung des Zufalls bedeutet zugleich den Beleg eines übergeordneten Planungsmusters.* Das Resultat von vielen Entscheidungen, die jeweils nur für den Einzelfall optimiert wurden, wäre hingegen am Ende in der archäologischen Überlieferung wiederum nur eine Zufallsverteilung. Erst die wiederholte Anwendung eines Planungsmusters würde sich vom Zufall unterscheiden. Wenn dieses Planungsmuster aus kurz- und langfristigen Planungsaspekten besteht, wird schließlich die Existenz von Nutzungseinschränkungen sehr wahrscheinlich (vgl. SACK 1986, 35 Fig. 2.1). Dabei kann man annehmen, dass die langfristig wirksamen Entscheidungen von den höchsten Autoritäten der beteiligten Gruppen gefällt wurden (a. a. O., 36). Die kurzfristige Planung entspricht dagegen der Ebene der Detailumsetzung durch die Nutzungsberechtigten.

Bei diesen theoretischen Überlegungen mag man einwenden, dass komplizierte Methoden nicht notwendig wären; das archäologisch geschulte Auge könne intuitiv beim Blick auf die oben vorgestellten Pläne bereits Ordnungsmuster erkennen; ein Test auf Zufall sei nicht nötig. Es handle sich ja um nichts anderes, als einen Hausgrundriss aus der Verteilung von Pfostenlöchern zu rekonstruieren. Es sollte aber eigentlich klar geworden sein, dass auch im archäologischen Alltagsgeschäft, etwa bei Häusern, unbewusst ständig Modellierungen vorgenommen werden. Ein solcher Einwand zwingt also eigentlich, die nach vermeintlich ‚gesundem Menschenverstand‘ mit ad hoc Verfahren erzeugten Modelle mit modernen Methoden zu aktualisieren.

Man vergleicht ja eigentlich ein abstraktes Prinzip wie etwa "Viereck aus einer Anordnung Pfostenlöchern" experimentell mit der Verteilung von Pfostenlöchern und bei Übereinstimmung wird ein Grundriss angenommen. Hier gibt es jedoch ein Vorwissen zum Aussehen der gesuchten Muster, was beim Bergbau nicht der Fall ist. Das hier verwendete Vorgehen hat der archäologischen Intuition gegenüber zwei entscheidende Vorteile: es kann rechnerisch auf Objektivität überprüft und auf unbekannte Muster angewendet werden.

Nach dieser Vorrede wird die Art der Schachtverteilung zunächst mit einem *Test* auf der Basis der *Thiessenpolygonflächen* untersucht (BOOTS et al. 1992, 412ff.).

Bereits durch die Bildung von Thiessenpolygonen stehen quantitative Möglichkeiten offen, um die Frage nach Zufall oder Planung zu beantworten. Der Ansatz des Testes stammt aus der Informationstheorie. Man versucht den Organisationsgrad eines Systems zu messen, also die im System enthaltene Information. Dieser Grad zeigt sich bei einer Punktverteilung in der unterschiedlichen Häufigkeit, mit der Punkte in Teilregionen der Untersuchungsfläche auftauchen. Bei zufälligen Verteilungen können Punkte in einer Teilfläche eng zusammengedrängt, in einer anderen weit verstreut auftreten (vgl. o.). Die Variation zwischen den Punktdichten in den Teilflächen ist also umso höher, je stärker der Einfluss des Zufalls ist. Bei einer Zufallsverteilung ist sie maximal, dicht und schwach besetzte Flächen wechseln regellos. Die räumliche Ungleichverteilung der Punkte erreicht Höchstwerte.

Das Maß für die auch als Entropie bezeichnete räumliche Ungleichverteilung ist der Kennwert H . Die Formel zu seiner Berechnung lautet:

$$H(x) = \sum_i^n p_i \cdot \ln(1/p_i).$$

Dabei ist p_i die Wahrscheinlichkeit einer zufallsverteilten Variablen, einen bestimmten Wert x_i anzunehmen. Sind die Punkte zufallsverteilt, sollte sich dies auch in der Verteilung der Thiessenpolygongrößen spiegeln. Man ersetzt einfach die einzelnen p_i durch den Anteil der einzelnen Thiessenpolygone A_i an der Gesamtfläche $\sum_i^n A_i$:

$$p_i = A_i / \sum_i^n A_i.$$

Die einzelnen Werte setzt man in die vorhergehende Formel ein und erhält als Ergebnis das Entropiemaß $H(x)$ für die untersuchte Punktverteilung. Um diesen Wert beurteilen zu können, muss er noch mit der hypothetischen, maximalen Entropie H_{max} in Bezug gesetzt werden. Die maximale Entropie H_{max} ist schlicht der natürliche Logarithmus der Punktzahl:

$$H_{max} = \ln n.$$

wobei n für die Anzahl der Punkte steht.

Aufgrund von Grenzwerteffekten verwendet man diese Werte jedoch nicht direkt. Stattdessen kommt Thiels Redundanzmaß R^* zur Anwendung. Es ist die Differenz zwischen H_{max} und H :

$$R^* = H_{max} - H(x).$$

Zum besseren Verständnis und für an der Anwendung interessierte Leser sei hier die Berechnung des Redundanzmaßes R^* noch einmal vollständig wiedergegeben:

$$R^* = \ln n - \sum_i^n ((A_i / \sum_i^n A_i) * \ln (1 / (A_i / \sum_i^n A_i))).$$

Im Fall eines vollständig regelmäßigen – und also nichtzufälligen Musters – ist R^* gleich Null. Je stärker die Punkte in einzelnen Teilflächen zusammengedrängt (“clustered“) sind, desto höher fällt R^* aus.

Um *statistisch sicher* feststellen zu können, ob die Punktverteilung auf den Zufall zurückgeht, ist jetzt noch eine bestimmte Überprüfung notwendig. Dafür berechnet man einen Prüfwert z und ermittelt, ob er jenseits bestimmter kritischer Werte liegt. Ist dies der Fall, kann mit einer Sicherheit (Signifikanzniveau α), die aus dem jeweils überschrittenen kritischen Wert abgeleitet wird, eine Zufallsverteilung ausgeschlossen werden. Wenn die Punktverteilung mehr als 15 Punkte umfasst, ist z annähernd standardnormalverteilt (Mittelwert 0, Standardabweichung 1; BOOTS et al. 1992, 414). Man überprüft nun die Fragestellung mit einem zweiseitigen Test. Dafür setzt man den Wert z in eine Standardnormalverteilung ein und ermittelt, welche Wahrscheinlichkeit sich nach dieser Formel für ihn ergibt. Im Regelfall wird ein Wert (α) als kritisch betrachtet, bei dessen Über- bzw. Unterschreitung – der Test ist wie gesagt zweiseitig (vgl. UPTON/FINGLETON 1985, 78) – die Wahrscheinlichkeit für z unter fünf Prozent sinkt. Ist also z kleiner als dieser kritische Wert, kann man eine Zufallsverteilung ablehnen und irrt sich dabei nur in einem von 20 Fällen, in den anderen 19 Fällen liegt man richtig. Die Ablehnung des Zufalls besitzt dann also eine Sicherheit von 95 %.

Mit solchen *statistischen Tests* kann man übrigens keine Wahrheit bzw. absolute Sicherheit für eine Aussage garantieren. Selbst bei Verfehlen eines kritischen Wertes α für 99,99 % beispielsweise sind Aussagen auch nur mit ‘an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit‘ gültig. Ein Test beweist also nichts absolut. Sein Ergebnis stellt aber in jedem Fall die höchste Aussagesicherheit für den untersuchten Sachverhalt dar, die man jenseits philosophisch definierter Wahrheit wissenschaftlich gewinnen kann.

Die Berechnung von z erfolgt, indem man die Differenz aus dem bei Zufälligkeit zu erwartenden Wert eR^* und dem berechneten R^* durch die Wurzel aus der Varianz von R^* teilt, die mit $varR^*$ bezeichnet wird:

$$z = (R^* - eR^*) / (varR^*^{1/2}).$$

Die Werte für eR^* und $varR^*$ wurden nicht extra berechnet, sondern tabellarisch aufgeführten Näherungswerten entnommen (BOOTS et al. 1992, 414 Tab. 8.1.1.).

Bevor man nun diesen Test anwendet, müssen noch sogenannte *Grenzeffekte* herausgefiltert werden. Sie treten auf, wenn die Flächen von Thiessenpolygonen berücksichtigt werden, die am Rand der Untersuchungsflächen liegen bzw. ihm benachbart sind. Eine Regel, mit der Verzerrungen durch Grenzeffekte vermieden werden können (BOOTS et al. 1992, 283 Fig. 5.3.1. und 410), ist im GIS durch einfache Pufferoperationen umsetzbar. Per Definition gibt es für jede Ecke eines Thiessenpolygons einen Kreis, auch Umkreis genannt, der durch genau drei der tesselierten Punktobjekte verläuft (STOYAN/STOYAN 1992, 384). Polygone, bei denen auch nur ein Umkreis um eine Polygonecke den Rand der Untersuchungsfläche schneidet, können Verzerrungen hervorrufen und werden deshalb nicht berücksichtigt. Im GIS ('MapInfo Professional Vertical Mapper') extrahiert man dafür die Eckpunkte der Thiessenpolygone ('poly-to-point'). Zur besseren Unterscheidung von den untersuchten Schachtmittelpunkten nennt man sie besser Vertex bzw. Vertices. Um die Schachtmittelpunkte wird sodann ein Abstandspuffer in Form einer Rasterkarte erzeugt. Jedem Vertex wird nun der Wert zugewiesen (Prozedur 'point inspection'), den die Abstandspufferrasterkarte an seiner Position aufweist. Daraufhin wird ein zweiter Abstandspuffer in Rasterkartenform für den Rand der Untersuchungsfläche erzeugt und den Vertices auf die erwähnte Art wiederum der Wert aus dieser Rasterkarte zugewiesen. An jeden Vertex liegen jetzt zwei Werte vor, der Abstand zu den nächsten Punktobjekten, der per Definition dem Radius des oben beschriebenen Umkreises entspricht, und der Abstand zum Rand. Mit einfachen Abfragen sortiert man alle Vertices heraus, bei denen der Abstand zum Rand kleiner ist als der Radius des Umkreises und entfernt die entsprechenden Thiessenpolygone aus der Berechnung des Entropiewertes H . Für die weitere Berechnung benutzt man dann die Areale der verbliebenen Thiessenpolygone A_i sowie deren Gesamtfläche $\sum_i^n A_i$, und nicht mehr die gesamte Untersuchungsfläche.

Als Ergebnis der *Grenzeffektbereinigung* hat sich die Karte mit den Thiessenpolygonen verändert (**Abb. 2.15**). Nach der Bereinigung verbleiben nur Polygone, die mehr oder weniger weit von den Grenzen der Untersuchungsflächen abgesetzt sind. Bei der Anzahl der Schachtmittelpunkte werden nur noch die einbezogen, deren Thiessenpolygone beim Test Verwendung finden.

Zu allen im Folgenden aufgeführten Rechenergebnissen sei noch bemerkt, dass sie jeweils mit größtmöglicher Genauigkeit berechnet wurden, um dann auf eine sinnvolle Genauigkeit gerundet zu werden. Auf die Auflistung der Einzelflächengrößen (A_i) für die beiden Untersuchungsflächen Kiesgrube und Halde wurde im Folgenden verzichtet.

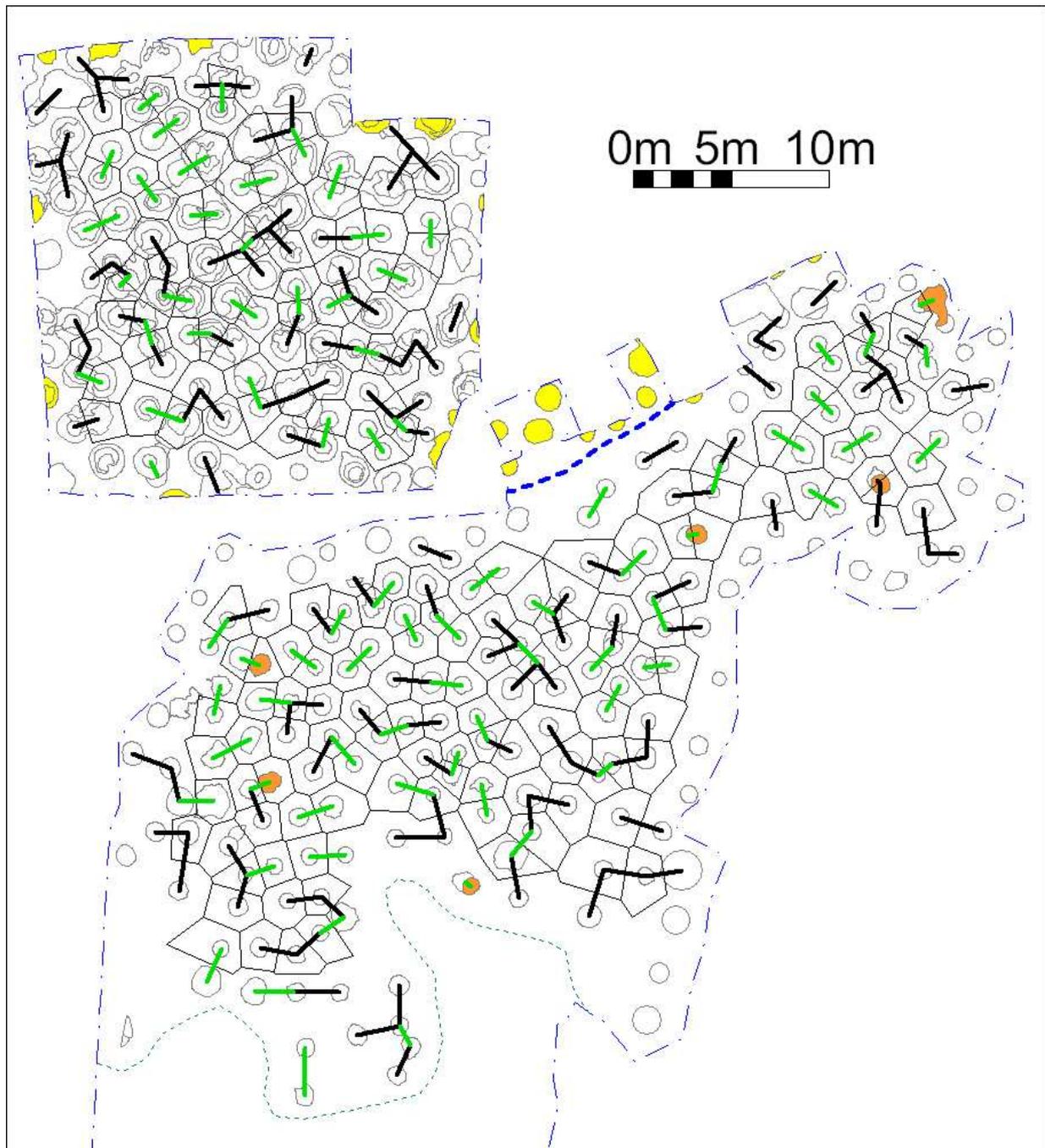


Abb. 2.15: Abensberg-Arnhofen. Datengrundlagen für die Analyse der Thiessenpolygone und der nächsten Nachbarn in beiden Untersuchungsflächen.

Die dargestellten Thiessenpolygone bilden die Auswahl für den Test auf Grundlage der Polygonflächen. Die dicken Linien stellen die Verbindungen zwischen den nächsten Nachbarn dar. Die grünen Linien bezeichnen Distanzen die für diesen Test doppelt gezählt werden müssen, da diese Schächte einander gegenseitig nächste Nachbarn sind. Beide Male sind die von Grenzeffekten betroffenen Punkte bereits herausgefiltert.

In der Kiesgrube sind Irrtümer bei der Lokalisierung (Überschneidungen) noch gut erkennbar und wurden daher extra gekennzeichnet (orange gefärbte Schächte). Die gelb unterlegten Schächte wurden bei den Tests und der Punktfeldstatistik nicht berücksichtigt.

In der Kiesgrube wurden zudem die Flächen, die mit blau und grün gestrichelten Linien abgeteilt sind, von der Analyse ausgeschlossen. Dies erfolgte teils aufgrund quellenkritischer Überlegungen, teils weil die südliche Bergwerksgrenze (grün gestrichelte Linie) klar festlegbar war.

Wendet man den *Test* nach der Grenzeffektkorrektur auf die *Kiesgrube* an, verbleiben noch 127 Schachtmittelpunkte (n), deren Thiessenpolygone insgesamt $501,55 \text{ m}^2$ ($\sum_i^n A_i$) bedecken. Setzt man die Formelergebnisse ein, erhält man mit 0,03314 für R^* einen extrem niedrigen Wert. Dies ist der erste objektive Anhaltspunkt für die extrem hohe Regelmäßigkeit der Schachtverteilung in der Kiesgrube. Nun gilt es noch zu testen, ob dieser Wert nicht doch zufällig sein könnte. Bei n gleich 127 ergeben sich für $eR^* \sim 0,132$ und $varR^* \sim 0,00031$ (BOOTS et al. 1992, 414 Tab. 8.1.1.). Für die Teststatistik z resultiert ein Wert von -5,6146. Überprüft man, welche Wahrscheinlichkeit dieser Situation bei einer standardnormalverteilten Zufallsvariable zukommt, zeigt sich ein deutliches Ergebnis. Für Z -Werte kleiner als -3,7 darf man mit einer Sicherheit von 99,99 % eine Zufallsverteilung ablehnen. Jetzt wird der visuelle Eindruck, die Schachtverteilung in der Kiesgrube könne nicht zufällig sein, durch eine objektive Aussage auf extrem hohem Sicherheitsniveau unterstützt.

Man kann also mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit behaupten, dass bei der Anlage neuer Schächte nicht beliebig viel Platz zur Verfügung stand. Die Bergleute kalkulierten die Größe der zur Verfügung stehenden Fläche und die Lage bereits bestehender und auch zukünftiger Schächte bei ihrem Vorgehen mit ein.

Auch für die Untersuchungsfläche in der *Halde* sind zunächst einige von Grenzeffekten betroffene Thiessenpolygone herauszufiltern (**Abb. 2.15 oben**). Es verbleiben danach noch 84 Schachtmittelpunkte (n). Die Gesamtfläche ihrer Thiessenpolygone beträgt $404,06 \text{ m}^2$ ($\sum_i^n A_i$). Für die Halde ergibt sich mit 0,02659 ein noch niedrigerer Wert für R^* als für die Kiesgrube. Hier ist die Zahl der zu berücksichtigenden Punkte niedrigerer ($n = 84$). Bei n gleich 84 beträgt der Wert für eR^* weiterhin näherungsweise 0,132, nur $varR^*$ erhöht sich auf ungefähr 0,00042 (BOOTS et al. 1992, 414 Tab. 8.1.1.). Der zu testende Wert z liegt mit -5,1483 nah an dem für die Kiesgrube. Auch für die Halde kann daher mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit (99,99 %) eine Zufallsverteilung ausgeschlossen werden. Die beiden Resultate stützen sich zudem gegenseitig.

Nach diesen Tests kann man also für beide im DFG-Projekt untersuchte Flächen den Zufall als Ursache der Schachtverteilung ausschließen. Die Platzierungen der einzelnen Schächte lassen demnach deutlich Antizipation weiterer Aktivitäten erkennen.

Es ist also hochwahrscheinlich, dass für das Bergwerk von Arnhofen irgendwie geartete *Nutzungsrechte* vorhanden waren, da die vorhandene Fläche die Lokalisierung eines Schachtes beeinflusste. Nicht jeder durfte irgendwo einen Schacht anlegen, und bestimmte Arbeitsgruppen konnten nur über bestimmte, abgegrenzte Flächen verfügen.

Damit ist aber das Potential der Daten noch nicht ausgeschöpft. Die Triangulationslinien bieten über verschiedene messbare Eigenschaften wie Länge oder Winkel zahlreiche anspruchsvolle Methoden zur Klärung der Frage nach dem Einfluss des Zufalls (vgl. z. B. BOOTS et al. 1992, 423 ff.).

Von diesen sei hier der einfachste und am häufigsten benutzte Test gewählt, der sogenannte *Clark-Evans-Test* auf der Basis der *Abstände der nächsten Nachbarn* (CONOLLY/LAKE 2006, 164f.; DAVIS 1986, 308ff.; LEVINE 2004, 5.1ff.; BOOTS et al. 1992, 423f.; PREISS 2006, 36ff.; REICH/DAVIS 2000, 66ff.; RIPLEY 1981, 152ff.; UPTON/FINGLETON 1985, 72ff., vgl. STOYAN/STOYAN 1992, 321). Genauer gesagt benötigt man den durchschnittlichen Abstand der nächsten Nachbarn. Da die Abstände der nächsten Nachbarn plausiblerweise aus mathematischen Gründen eine Teilmenge der Triangulationslinien sein müssen (DIGGLE 2003, 18f.), kann man sie leicht aus ihnen extrahieren.

Der Clark-Evans-Test wird aber auch deswegen vorgestellt, da man für ihn nicht einmal digitale Pläne braucht. Die Abstände der nächsten Nachbarn könnte man auch einfach mit Hilfe eines Lineals von Hand aus irgendwelchen alten Plänen ermitteln. Dieser Test kann also auch ganz ohne den Einsatz von GIS und sogar ohne den von Computern durchgeführt werden.

Aber auch wenn man über beides verfügt und zusätzlich auf eine Triangulation zurückgreifen kann, muss ein Teil dieses Schrittes quasi manuell durchgeführt werden: Bei jedem Schacht ist stets die kürzeste der Triangulationslinien zu wählen, die von ihm ausgeht. Dabei kann durchaus eine Linie zweimal gezählt werden, wenn die beiden mit ihr verbundenen Schächte sich gegenseitig jeweils der nächste Nachbar sind (**Abb. 2.15 grüne Linien**). Von all diesen Triangulationslinien berechnet man den Mittelwert ihrer Länge und verfügt somit über die durchschnittliche Entfernung zwischen den nächsten Nachbarn.

Die hinter dem Clark-Evans-Test stehende *Argumentation* ähnelt der des vorhergehenden Testes. Bei einer Zufallsverteilung treten wie erwähnt sowohl Bereiche mit hohen wie mit niedrigen Punktdichten auf. Entsprechend sollten also neben nächsten Nachbarn, die sehr nahe beieinander liegen, auch solche auftreten, die sehr weit voneinander entfernt sind. Die Verteilung der Abstände zwischen allen nächsten Nachbarn müsste deshalb bei Zufall eine bestimmte Form und ihr Durchschnitt einen bestimmten Wert annehmen. Zur Untersuchung dieser Frage nach dem Einfluss des Zufalls reicht hier also bereits der durchschnittliche Abstand zwischen den nächsten Nachbarn. Diesen Durchschnitt setzt man mit zwei weiteren Werten in Bezug, nämlich dem bei Zufälligkeit zu erwartenden Mittelwert und dessen möglicher Schwankungsbreite.

Die *Anwenderfreundlichkeit* des Clark-Evans-Test wird aus der Anzahl der sonst noch benötigten Informationen ersichtlich. Neben dem durchschnittlichen Abstand der nächsten Nachbarn D wird lediglich die Größe der untersuchten Fläche A und die Anzahl der Punkte n in dieser Fläche benötigt.

Der bei Zufälligkeit zu erwartende durchschnittlichen Abstand eD wird mit folgender Formel berechnet:

$$eD = 0,5 * (A / n)^{1/2}.$$

Der Index aus dem erwarteten durchschnittlichen Abstand eD und dem konkret vorliegenden Mittelwert D wird in der Literatur ebenfalls als R bezeichnet (DAVIS 1986, 310; BOOTS et al. 1992, 423; PREISS 2006, 40; RIPLEY 1981, 153). Um Verwechslungen mit dem oben vorgestellten Entropie-Index R^* auszuschließen, wird hier eine andere Bezeichnung gewählt. Abgeleitet von Anfangsbuchstaben des Wortes Verteilungsmaß wird anstatt R das Symbol V verwendet. Das als Clark-Evans-Index bekannte, nun mit V bezeichnete Maß, berechnet man:

$$V = D / eD.$$

Der Clark-Evans-Index V ist ein sehr *hilfreicher Kennwert* für die Beschreibung einer Punktverteilung. Schließt man das Auftreten von Punkten mit identischen Koordinaten aus, schwankt er zwischen nahe Null und 2,149 (PREISS 2006, 40; vgl. CONOLLY/LAKE 2006, 165 oder DAVIS 1986, 311). Ist V deutlich kleiner als 1, sind die Punkte dichter zusammengedrängt ('clustered'), als es bei einer nur vom Zufall geprägten Verteilung der Fall sein dürfte (CONOLLY/LAKE 2006, 165; DAVIS 1986, 311; LEVINE 2004, 5.3; BOOTS et al. 1992, 424; PREISS 2006, 40; vgl. RIPLEY 1981, 153). Überschreitet V merklich den Wert 1, weist die Punktverteilung Abstände auf, die regelhafter ausfallen, als dies bei einer Zufallsverteilung der Fall sein dürfte. Im Extremfall eines völlig regelmäßigen Bienenwabenmusters erreicht V den Wert 2,149. Liegt der Clark-Evans-Index nahe bei 1, weist dies auf eine Zufallsverteilung hin. Der Index gibt also nicht nur Hinweise darauf, ob eine Punktverteilung vom Zufall abweicht, sondern auch, ob diese Abweichung durch regelhafte Abstände oder durch überdurchschnittlich starke Zusammendrängung der Punkte verursacht ist.

Auch bei diesem Kennwert kann man entscheiden, ob dabei noch *Zufallseinflüsse* wirksam sind. Abhängig von der Größe der Untersuchungsfläche und der Punktzahl darf V in einem gewissen Bereich um den Wert 1 schwanken, ohne dass man den Zufall ablehnen dürfte. Auch hier ist wiederum zu überprüfen, ob die Schwankung noch im Bereich des Zufälligen liegt. Der Prüfwert CE berechnet sich wie der obige Prüfwert z ebenfalls aus der Differenz eines empirisch vorliegenden und eines erwarteten Wertes, die man dann durch die bei Zufall zu erwartende Standardabweichung teilt.

Die Standardabweichung ist gleich der Wurzel aus der Varianz vD der Zufallsverteilung. Um die Varianz vD bei einer Zufallsverteilung zu berechnen, ist ebenfalls nur die Flächengröße A und die Punktzahl n nötig:

$$vD = 0,06831 * A / n^2 .$$

Nach dem bereits bekannten Muster lautet die Formel für den Prüfwert:

$$CE = (D - eD) / (vD^{1/2}).$$

Diesen Wert CE setzt man ebenfalls mit einer Standardnormalverteilung in Beziehung und ermittelt, welche Wahrscheinlichkeit sich für ihn ergibt bzw. man überprüft, ob er größer ausfällt als ein kritischer Wert α , dessen Wahrscheinlichkeit bei einer standardnormalverteilten Zufallsvariablen 95 % entspricht. Ist dies der Fall, kann man wiederum den Zufall mit dem entsprechenden Sicherheitsniveau von 95 % ablehnen (s. o.).

Streng mathematisch gesehen ist dieses Verfahren bei *kleinen Untersuchungsflächen* sehr anfällig für Fehler (STOYAN/STOYAN 1992, 321), denn wie beim ersten Test können auch hier Verzerrungen durch sogenannte Grenzeffekte auftreten. Diese werden umso problematischer, je kleiner die Punktzahl wird. Für die Klärung dieses Problems, wann genau ein Untersuchungs-fenster gegenüber der Gesamtverteilung zu klein ist, scheint es aber noch keine Regel zu geben. Die Verzerrungen treten durch solche Punkte auf, bei denen die Entfernung zum Rand der Untersuchungsfläche kleiner ist, als die zu ihrem nächsten Nachbarn. Preiss empfiehlt eine Korrektur von Grenzeffekten bei weniger als 200 Punkten (ders. 2006, 43). Aus Gründen numerischer Genauigkeit empfiehlt der Autor grundsätzlich auch bei größeren Punktwolken ein Grenzeffekt-korrektur wie etwa die folgende zu verwenden.

Die einfachste Variante der *Grenzeffektkorrektur* besteht darin, die Punkte in einem bestimmten Streifen entlang des Randes, der nicht mit der natürlichen Grenze übereinstimmt, zu einer Pufferregion zu erklären (PREISS 2006, 43; vgl. RIPLEY 1981, 151f.; UPTON/FINGLETON 1985, 73). Punkte in dieser Region können dann zwar der nächste Nachbar für weiter innen liegende Punkte sein, für sie selbst bestimmt man aber keinen nächsten Nachbarn. Hier wurden alle Punkte der Pufferregion zugeordnet, die dem Rand näher liegen als ihrem nächsten Nachbarn innerhalb der Untersuchungsfläche. Die Umsetzung dieser Korrektur von Grenzeffekten ist im GIS einfach zu bewerkstelligen. Den Punkten wird aus dem bereits in Rasterkartenform vorliegenden Abstandspuffer um die Grabungsgrenze die jeweilige Entfernung zum Rand zugewiesen (vgl. o.). Alle Punkte, bei denen dieser Wert größer ist als der Abstand zum nächsten Nachbarn, werden der Pufferregion zugewiesen.

Diese Punkte können dann zwar der nächste Nachbar für einen Punkt im Innern der Untersuchungsfläche sein, für sie selbst wird aber kein nächster Nachbar gesucht.

Sowohl für die Halde wie auch die Kiesgrube wird die beschriebene Korrektur möglicher Grenzeffekte durchgeführt. In beiden Arealen werden zunächst die Schachtmittelpunkte ausgeschlossen, die außerhalb der Grabungsgrenzen erschlossen wurden. Das betraf in der Halde 12, in der Kiesgrube 5 Schächte. Zusätzlich wurden noch bei der Kiesgrube besonders verwinkelte Bereiche der Untersuchungsfläche abgetrennt (**Abb. 2.15 dicke blaue Strichlinie**), und so die Zahl um weitere 6 Schächte verringert. Alle auf diese beiden Arten ausgeschlossenen Schächte wurden in Abbildung 2.15. kenntlich gemacht (**Abb. 2.15 gelb markierte Befunde**). Danach verbleiben in der Halde noch 141 und in der Kiesgrube noch 216 Schachtmittelpunkte. Wiederrum wurde auf eine Auflistung der einzelnen Streckenlängen verzichtet und für beide Untersuchungsflächen der Durchschnitt der Abstände zwischen den nächsten Nachbarn im GIS berechnet.

Nach dieser Vorbereitung ist der eigentliche Test für beide Teilflächen einfach auszuführen. Auf dem Areal der *Kiesgrube* gingen wie gesagt 216 Schachtmittelpunkte (n) in die Untersuchung ein. Nach dem Abtrennen der beiden schmalen und verwinkelten Nischen am Nordrand und der Südgrenze des Bergwerkes (**Abb. 2.15 dünne grüne Strichlinie**) verblieb noch eine Fläche (A) von $1015,77 \text{ m}^2$. Die Ziehung der Grenze erfolgte in gewissem Sinne willkürlich, da man sie näher an den Schächten oder auch mehrere Meter weiter außen hätte ziehen können. Klar ist aber in jedem Fall, dass man im Areal der Kiesgrube die tatsächliche Südgrenze des Bergbaus erfasst hat und daher begründeterweise eine Grenze ziehen darf. Einfaches Experimentieren ergab nun, dass die weiter unten beschriebenen Ergebnisse selbst dann stabil bleiben, wenn man die Fläche 200 m^2 größer oder kleiner wählt. Mit anderen Worten, eine willkürliche Ziehung der Südgrenze in einem hier angemessenen Rahmen hat keinen signifikanten Einfluss auf die folgenden Resultate.

Der durchschnittliche Abstand der nächsten Nachbarn (D) in der Kiesgrube beträgt $1,599 \text{ m}$. Bei einer Zufallsverteilung wäre dagegen ein Mittelwert (eD) von $1,084 \text{ m}$ zu erwarten. Der Clark-Evans-Index (V) beläuft sich demnach auf $1,475$. Das spricht deutlich gegen eine Zufallsverteilung. Gleichzeitig verweist dieser über 1 liegende Wert auf eine regelhafte Verteilung der Schächte. Bevor man aber mit diesem Ergebnis zufrieden ist, gilt es noch zu überprüfen, ob dieser Wert im Bereich der bei Zufall zulässigen Schwankungsbreite liegt. Nach weiterem Einsetzen erhält man als Varianz (vD), die bei einer Zufallsverteilung zu erwarten wäre, den Wert $0,0386$. Der Prüfwert (CE) beträgt demnach $13,357$ und übertrifft alle üblicherweise sonst genutzten kritischen Werte deutlich (z. B. α für $99,9999 \%$ gleich $4,77$).

Bei der folgenden Aussage besteht also praktisch kein Irrtumsrisiko mehr: Die Schachtverteilung in der Kiesgrube ist eindeutig kein Zufall; sie geht außerdem auf regelhafte Abstände zwischen den Schächten zurück. Bei der Planung spielten also bestimmte, immer wieder eingehaltene Abstände zwischen den ehemaligen und den neuen Schächten eine Rolle.

Wie steht mit dieser Frage in der *Halde*? Hier beträgt die Fläche (A) 489,80 m² und die verbleibende Punktzahl beläuft sich auf 141. Der durchschnittliche Abstand der nächsten Nachbarn beträgt 1,444 m, und ist damit um 0,15 m kleiner als in der Kiesgrube. Wären die Schächte zufällig verteilt, sollte sich ein Mittelwert (eD) von 0,932 m ergeben. Als Clark-Evans-Index (V) ergibt sich ein Wert von 1,549, was wiederum gegen eine Zufallsverteilung und für regelhafte Abstände zwischen den Schächten spricht. Auch hier ist noch der Test durchzuführen, bevor man dieses Resultat abschließend beurteilen darf. Nach der oben vorgestellten Formel berechnet sich die Varianz (vD) auf 0,0410. Die weitere Rechnung führt zu einem Prüfwert (CE) von 12,481 – das Resultat des Testes entspricht damit dem der Kiesgrube, denn das α für 99,9999 % Aussagesicherheit beträgt auch hier 4,77. Bei der Halde ist ein Irrtumsrisiko ebenfalls praktisch ausgeschlossen. Die Schachtverteilung ist wiederum nicht vom Zufall sondern von regelhaften Abständen geprägt. Genaugenommen waren diese beiden Ergebnisse nach dem vorangehenden Test mit den Polygonflächen schon zu erwarten, hier erhält man allerdings noch eine Information darüber, warum sich die untersuchte Verteilung von einer Zufallsverteilung unterscheidet. Zusätzlich zum bisherigen Ergebnis der Teste weiss man nun, dass sich beide Schachtverteilungen durch hochsignifikante Regelmäßigkeit auszeichnen.

Als *Resultat des Clark-Evans-Tests* kann Folgendes festgestellt werden: Bei der Nutzung der Bergwerksflächen beachtetten die neolithischen Bergleute nicht nur die verfügbare Fläche und (mindestens) die Lage der jeweils schon vorhandenen Schächte. Auch die Restfläche und deren Ausnutzung wurde grundsätzlich bei der Anlage der meisten Schächte antizipiert. *Es existierte ein Planungsmuster dessen Ursache in der Existenz von 'Claims' für einzelne Benutzergruppen lag.*

2.1.4.2. Punktfeldstatistische Analyse der Schachtverteilung

Die bisherigen Ausführungen zeigen, welche Einblicke sich bereits durch die Untersuchung von Triangulation und Tesselierung ergeben. Um die Eigenschaften der Schachtverteilung genauer zu untersuchen, empfiehlt sich der Einsatz anspruchsvollerer Methoden aus dem Bereich der Punktfeldstatistik (s. o. 2.1.3.). Die **Abbildung 2.16.** zeigt, welche Flächen und Punkte die im Folgenden analysierten Punktfelder Kiesgrube und Halde bilden.

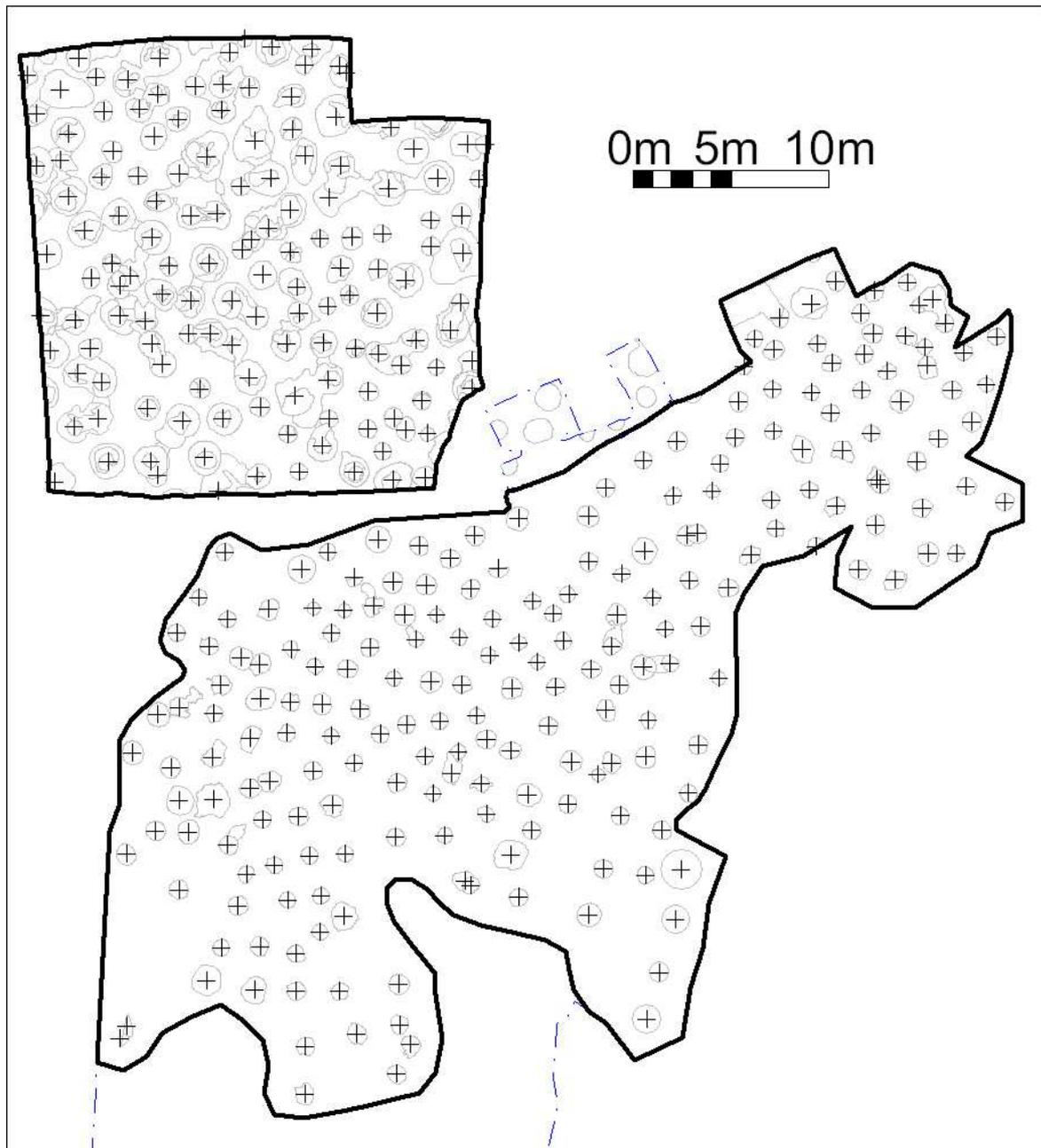


Abb. 2.16: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik.

Die Punktfelder Kiesgrube (unten) und Halde (oben). Die schwarzen Linien sind die Grenzen der untersuchten Ausschnitte und die Kreuze markieren die Punkte, die den beiden Punktfeldern zugeschlagen wurden.

Wie schon bei den vorangegangenen Tests gehen bestimmte Schächte nicht in diese Auswertung ein.

Leser, die weniger an der Methodik und mehr an den *Ergebnissen* interessiert sind, können die nächsten Seiten überblättern und finden am Ende dieses Teilabschnittes die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst.

Zum besseren Verständnis der folgende Passage ist genauer auf die *Arbeitsweise von punktfeldstatistischen Methoden* einzugehen. Um eine Punktverteilung geostatistisch zu untersuchen, muss man sie mathematisch modellieren. Was hier bisher umgangssprachlich Punktverteilung genannt wurde, wird im Weiteren der Methode folgend als Punktfeld bezeichnet. Eine konkrete Punktverteilung wird dabei als Ausschnitt der Realisierung eines sogenannten Prozesses angesehen. Eine Abfolge von Punktplazierungen auf einer Fläche, die alle dem gleichen übergeordneten Prinzip folgen, bezeichnet man in der Punktfeldstatistik auch als Prozess. Man unterstellt quasi, die vorgefundene Verteilung sei Ausdruck eines abstrakten Prinzips, das für die Eigenheiten dieser Verteilung verantwortlich ist. Weiterhin wird angenommen, die untersuchte Verteilung sei ein Ausschnitt aus einem mindestens sehr großen Punktfeld. Eine weitere Annahme ist, bei jeder Platzierung eines Objekts in dieser Verteilung habe sich das zugrundeliegende Prinzip auf eine bestimmte Weise Geltung verschafft. Deshalb kann man es aus der Analyse der Punktverteilung, also der Gesamtheit der Einzelplatzierungen, wieder ableiten.

Wenn der untersuchte Ausschnitt Teil eines viel größeren Punktfeldes ist, kann man ihn mit Methoden untersuchen, die für unendlich große Punktfelder entworfen wurden (STOYAN/STOYAN 1992, 219ff.). Weiterhin geht man davon aus, dass ein Punktfeld homogen sei, d.h. das Verteilungsprinzip – nicht die Lage der Punkte (!) – sei in der gesamten Fläche gleichartig. Für die Halde bereitet diese Annahme keine Probleme. Bei der Kiesgrube aber gibt es Argumente (vgl. u. Quantil-Quantil-Tests der Triangulationslinienlängen), die diese Annahme problematisch machen. Die für sie gewonnenen Ergebnisse sind daher auf folgende Art einzuschränken: sie gelten für gleich breite Randstreifen des Bergwerks, bei denen Untergrund wie Struktur des Flözes ähnlich sind und deren Schachtverteilung nicht oder nur kaum durch späteren Bergbau gestört wurde. Dabei ist der zweite Aspekt der eigentlich wichtige. Genaugenommen gelten also die Ergebnisse der Kiesgrube für alle Bereiche mit nur einer Abbauphase. Außerdem wird bei manchen Verfahren von einem isotropen Punktfeld ausgegangen, d.h. die Eigenschaften des Punktfeldes weisen keinen Bezug zu einer Richtung auf. Schließlich wird für beide Flächen Ergodizität angenommen, d.h., die vorliegenden Pläne reichen aus, um gesicherte Aussagen über die Schachtverteilung treffen zu können.

Nach archäologischem Alltagsverständnis mag es paradox erscheinen, aber auch der *Zufall* kann in der Mathematik als ein Verteilungsprinzip aufgefasst und mittels einer Formel dargestellt werden. Bezeichnet man eine Punktverteilung als zufällig, so könnte man auch sagen, das allgemeine Prinzip hinter dieser Verteilung sei ein sogenannter Poissonprozess (BOOTS et al. 1992, 58; DIGGLE 2003, 6 und 47f.; HODDER/ORTON 1976, 31; IHM 1978, 67; RIPLEY 1981, 13f.; UPTON/FINGLETON 1985, 10ff.). Für die zugrundeliegende Mathematik sei auf die angeführte Literatur verwiesen. Mathematisch modelliert man eine zufällige Punktverteilung also mit einer Poissonformel. Dabei drückt man das abstrakte Prinzip durch die Punktdichte λ aus, also die Anzahl der Punkte pro Flächeneinheit. Streng genommen müsste man weitere Anstrengungen unternehmen, um eine optimale Annäherung an die Punktdichte des zugrundeliegenden Prozesses zu erreichen (UPTON/FINGLETON 1985, 105ff.) Für den Anwendungsfall reicht aber in der Regel die Annahme aus, die Punktdichte der jeweils untersuchten Verteilung entspreche der eigentlichen Punktdichte (a. a. O. 10ff.). Danach gilt:

$$\lambda = n / A$$

wobei λ die Punktdichte, n die Anzahl der Punkte und A der untersuchte Flächenausschnitt ist. Die Punktdichte λ ist also einfach das Maß für die Punktzahl pro Flächeneinheit. Diese drei Bezeichnungen werden weiter unten wieder verwendet.

Bei einer *Poissonverteilung* lässt sich die Verteilung durch nur einen Kennwert beschreiben, der aus zwei Basisinformationen abgeleitet wird. Es bedarf keiner weiteren Information zur Modellierung. Für eine poissonverteilte Variable x lautet die allgemeine Formel (IHM 1978, 66):

$$f(x) = e^{-\lambda} * (\lambda^x / x!).$$

Steht nun für eine empirische Punktverteilung in Frage, ob es sich um eine Poissonverteilung handelt, kann man auf verschiedenem Wege überprüfen, ob die vorliegende Verteilung noch im Bereich dessen liegt, was als Ausprägung einer Poissonverteilung betrachtet werden kann. Ein relativ anspruchsloses und heute nur noch selten verwendetes Vorgehen dieser Art – eine sogenannte Quadratmethode – wird zusammen mit einer Anwendung der Formel einem anderen Kapitel erläutert (s. u. 4.1.2.). Ein anderer Weg der Überprüfung ist der oben vorgestellte Clark-Evans-Test. Im Folgenden werden dagegen anspruchsvollere Methoden verwendet.

Grundsätzlich können ebenso wie bei den obigen Tests auch bei den punktfeldstatistischen Methoden *Randeffekte* durch randlich gelegene Punkte auftreten. Solche Verzerrungen (engl. ‘edge effects’) muss man also auch hier korrigieren. Die Software bietet zur Lösung dieses Problems eine Reihe von Korrekturvarianten. Dabei wurde stets eine Methode gewählt (‘correction type’ = ‘translate’), die bei kompliziert geformten Untersuchungsflächen empfohlen wird (BADDELEY/TURNER 2006, 55).

Im Weiteren werden die Graphen für sechs punktfeldstatistische Funktionen vorgestellt und analysiert. Die Begrifflichkeit orientiert sich aus Gründen der Nachvollziehbarkeit an der Nomenklatur der englischen ‘point pattern analysis’, wie sie im Modul ‘spatstat’ verwendet wird.

Die verwendeten *punktfeldstatistischen Methoden* sind: die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion der Abstände zwischen den nächsten Nachbarn $G(r)$, die sphärische Kontaktverteilungsfunktion $F(r)$, die Hazardrate dieser Funktion $\lambda(r)$, Van Lieshout und Baddeley’s Index $J(r)$, Ripley’s K in der Transformation $L(r) = (K(r) / \pi)^{1/2} - r$ und die Punktpaarkorrelationsfunktion $pcf(r)$, auch als $g(r)$ bezeichnet. Die Reihenfolge orientiert sich grob an der zunehmend komplizierter werdenden Statistik der einzelnen Methoden.

Die Auswahl dieser Methoden folgte zum Teil den Empfehlungen der Literatur (DIGGLE 2003, 28), andere wie etwa $L(r)$ und $g(r)$ wurden herangezogen, weil sie mittlerweile als Standardmethoden gelten können. Die Wahl der jeweils maximal berücksichtigten Abstandsvariablen r orientiert sich bei $G(r)$, $F(r)$, $\lambda(r)$, $J(r)$ und $pcf(r)$ an den durch ihre Mathematik bedingten Grenzwerten. Bei $L(r)$ wurde der Bereich mit signifikanten Resultaten betrachtet.

Bei den meisten dieser Methoden kann man die *nichtzufälligen Phänomene* direkt am Ergebnisgraphen erkennen. Dafür bietet die benutzte Software die Möglichkeit, den (empirischen) Graphen des untersuchten Punktfeldes mit einem Graphen zu vergleichen, der theoretisch bei einem bestimmten Prozess zu erwarten ist (BADDELEY/TURNER 2006, 157: ‘envelope’; vgl. DIGGLE 2003, 13ff.). Der empirische Graph entspricht dabei manchmal einer empirischen Verteilungsdichtefunktion (DIGGLE 2003, 13: “empirical density function“). Obwohl die vorangegangenen Tests bereits die Ablehnung eines Poissonprozesses mit extrem hoher Sicherheit erlauben, wird im Folgenden, soweit nicht ausdrücklich anders vermerkt, immer ein Poissonprozess als theoretischer Graph abgebildet. Dadurch kann man erkennen, wo genau die Abweichungen zwischen der beobachteten und einer zufälligen Verteilung liegen. Wenn solche Abweichungen bestimmte Grenzwerte überschreiten, hat man es mit signifikanten Beobachtungen zu tun.

Das Verfahren wird auch als *Monte-Carlo-Test* bezeichnet (RIPLEY 1981, 16ff.; vgl. CONOLLY/LAKE 2006, 166). Dafür werden im Graphen zwei weitere Linien gezeichnet: Sie stellen die obere und untere Grenze für Schwankungen dar, die bei einem Zufallsprozess möglich sind. Ihr Verlauf richtet sich nach Fläche und Punktzahl des Feldes, für die der Prozess simuliert wird. Verläuft der empirische Graph bei einem Entfernungswert r außerhalb der vorgezeichneten Schwankungsbreite, kann man mit einer bestimmten, vorher gewählten, Sicherheit einen Zufallseinfluss bei diesen Abweichungen ablehnen.

An der X-Achse des Graphen erkennt man, bei welchen *Entfernungen* diese Abweichungen auftreten. Gegenüber den Tests aus dem Teilabschnitt 2.1.4.1. vermitteln diese punktfeldstatistischen Methoden nicht nur Informationen darüber, ob das Punktfeld die allgemeine Eigenschaft *Regelmäßigkeit* aufweist. Es lässt sich vielmehr genau bestimmen, bei welchen Punktabständen signifikante Phänomene vorliegen. Auf diese Weise werden also die Details die *Regelmäßigkeit* erfasst. Dadurch kann man die Interpretation möglicher Ursachen der signifikanten Abweichungen auf eine optimale Informationsauswertung gründen.

Die Schwankungsbreite, also das statistische *Sicherheitsniveau*, kann man vorher durch die Wahl der Simulationsanzahl einstellen. Bei fast allen Graphen wurde das Signifikanzniveau auf 99 % eingestellt. Die meisten der folgenden Ergebnisse besitzen also eine extrem hohe *Verlässlichkeit*. Bei der Funktion $g(r)$ wurde das 95 %-Niveau gewählt. Ein Sicherheitsniveau von 95 % entspricht der üblichen statistischen Praxis. Die hier ansonsten verwendeten 99 % stellen dagegen ein extrem hohes Sicherheitsniveaus dar. Bei der Hazardrate $\lambda(r)$ für die sphärische Kontaktverteilungsfunktion ist kein Vergleich mit einem Zufallsprozess nötig. Die Berechnungsart der Schwankungsbreite bei den anderen Graphen erfolgte für jeden Abstandswert r individuell ('pointwise': BADDELEY/TURNER 2006, 159).

Es wird im Folgenden nicht mehr jedesmal extra darauf hingewiesen, dass die Schächte einen gewissen Durchmesser besitzen und man daher immer etwa 1 m von den r -Werten abziehen muss, um den eigentlichen Bezug der Schächte zu erhalten.

Bevor die Methoden zum Einsatz kommen, ist noch einmal grundsätzlich auf den Unterschied zwischen den beiden *Untersuchungsflächen* hinzuweisen. Mit der Kiesgrube stand ein Areal zur Verfügung, auf dem die Befunde eindeutig Schächte sind. Auch waren hier die Spuren des Abbaus in einer Weise überliefert, die bereits beim bloßen Betrachten *Regelmäßigkeiten* vermuten ließ. In solch einem Fall ist es auch einfacher, zwischen der Methodik, dem eigenem Eindruck und den Resultaten eine Beziehung herstellen zu können. Bei den auf dem Areal der Halde untersuchten Befunden handelt es sich nicht bei allen Erdeingriffen um Schächte. Da sie jedoch den Zustand nahe der Oberfläche im Bergwerksinneren reflektieren, sind auch sie Quellen erster Güte für die Analyse der räumlichen Organisation. Die Untersuchungsergebnisse können also zwischen beiden Flächen verglichen werden.

Bisher wurde der Zufall auf allgemeinem Niveau für die Gesamtverteilungen abgelehnt. Mit den folgenden Methoden kann man nun genauer die Eigenschaften der regelmäßigen Schachtverteilungen herausstellen.

Die am einfachsten verständliche punktfeldstatistische Methode stützt sich auf die Summenhäufigkeitsfunktion der *Abstände zwischen den nächsten Nachbarn* (BADDELEY/TURNER 2006, 26: Funktion „*Gest*“; DIGGLE 2003, 17ff. und 60ff.; UPTON/FINGLETON 1985, 79ff.; vgl. IHM 1978, 47).

Die relative *Summenhäufigkeitsfunktion* stellt eine Verteilung auf folgende Weise dar (IHM 1978, 21ff.): Nach rechts wird die Merkmalsgröße abgetragen, nach oben die kumulierte Häufigkeit dieser Größe. Der Y-Wert bei einem bestimmten x_j , also der Funktionswert $f(x_j)$, bezeichnet demnach den Anteil aller Fälle, bei denen das untersuchte Merkmal maximal den Wert x_j einnimmt. Man kann diese Häufigkeit auch als die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fällen betrachten, bei denen das Merkmal x maximal die Merkmalsgröße x_j besitzt. Die Werte der Y-Skala reichen dabei von 0 bis 1. Man multipliziere sie mit 100, um sich die Häufigkeit in Prozent zu vergegenwärtigen.

In der Punktfeldstatistik wird die *Funktion*, die die Abstände zwischen den nächsten Nachbarn darstellt, als $G(r)$ bezeichnet. Dabei ist r die Entfernung zwischen nächsten Nachbarn. Der Funktionswert $G(r_i)$ für eine bestimmte Entfernung r_i bedeutet, so und soviel Prozent aller Punkte haben einen Abstand zum nächsten Nachbarn, der maximal so groß ist wie r_i . Der Graph verläuft also immer als eine Art Kurve von links unten nach rechts oben. Liest man nun beispielsweise bei einem r von 2,3 m einen Y-Wert von 0,8 ab, bedeutet dies: Bei diesem Punktverteilungsprozess haben 80 % der Punkte einen nächsten Nachbarn der maximal 2,3 m entfernt ist.

Da bei dieser Darstellungsart zunächst die Abstände aus der konkreten Punktverteilung zugrunde gelegt werden, könnte man auch sagen, dass in der untersuchten Verteilung 80 % aller Abstände zwischen zwei nächsten Nachbarn 2,3 m oder weniger messen. Der Graph dieser Funktion verläuft verständlicherweise ab einem bestimmten X-Wert waagrecht mit dem Y-Wert 1. Dieser X-Wert ist der längste vorhandene Abstand zwischen zwei nächsten Nachbarn. Dann gilt nämlich: 100 % aller Punkte haben einen nächsten Nachbarn der r m oder weniger entfernt ist.

Die *Interpretation* orientiert sich am Verlauf des Graphen, besser gesagt an seiner Steigung. Verläuft er zwischen den Werten r_1 und r_2 waagrecht, bedeutet dies, dass es keine Abstände zwischen nächsten Nachbarn gibt, die in dieses Werte-Intervall fallen. Wenn der Graph beispielsweise zwischen 0 m und 1 m beinahe waagrecht verläuft, ohne dabei merklich anzusteigen, gibt es kaum Abstände, die kleiner als 1 m sind. Steigt er dagegen beispielsweise im Intervall zwischen 1 m und 1,4 m steil an, so heißt dies, es gibt besonders viele Abstände zwischen nächsten Nachbarn in dieser Größenklasse.

Auch das Auftauchen von Stufen besitzt einen gewissen Informationsgehalt. Bei einem einheitlich, also für alle Abstände in der gleichen Art, wirksamen Prozess sollte der Graph kontinuierlich verlaufen. Treten dagegen Stufen auf, so bedeutet dies, dass hier das Kontinuum unterbrochen ist und bestimmte Abstände nicht auftreten. Es kann auch bedeuten, hier wurden unterschiedliche Verteilungen mit im Einzelnen kontinuierlich verlaufenden Graphen vermischt und die Obergrenze der einen Verteilung wird zur Stufe im vermischten gemeinsamen Graphen (vgl. DIGGLE 2003, 81 Fig. 5.9).

Untersucht man Objekte, die in *Konkurrenz* um eine Ressource stehen, bilden die Abstände der nächsten Nachbarn einen objektiven Ansatz zur Schätzung der jeweils kleinsten Distanz zwischen zwei solchen Objekten (DIGGLE 2003, 17). Im vorliegenden Fall entsteht aus dem oben skizzierten Interesse der Bergleute (s. o. 2.3.), das Flöz ohne Verluste abzubauen, eine Art Konkurrenzsituation um die Fläche, die für die Anlage eines Schachtes nötig ist. Die Ergebnisse dieser Methode liefern also eine Schätzung für die geplanten bzw. noch akzeptierten Mindestabstände zwischen Schächten.

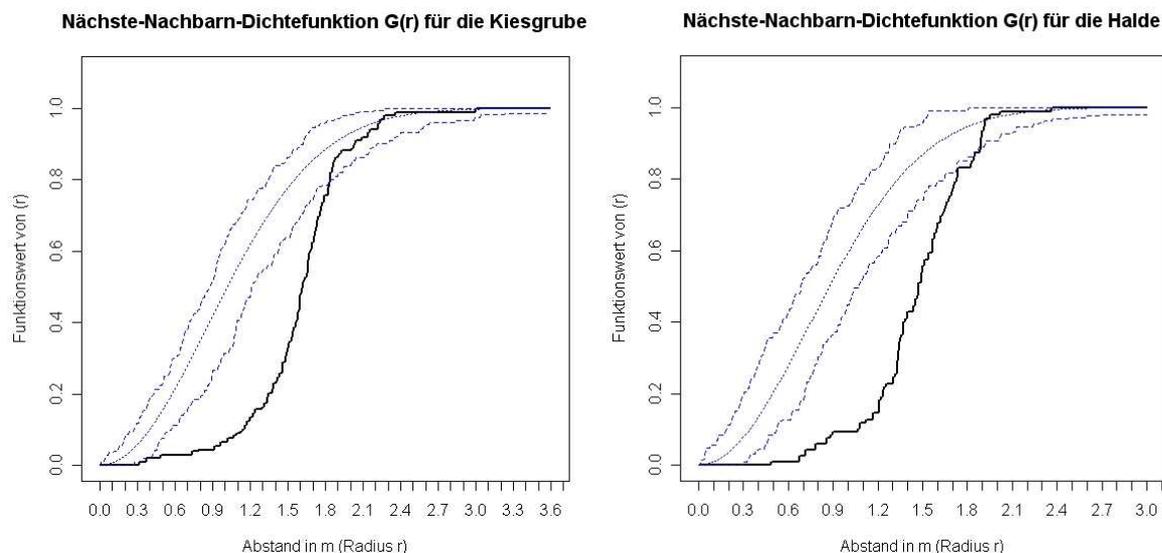


Abb. 2.17: Abensberg-Arnshofen - Punktfeldstatistik. Wahrscheinlichkeitsfunktion $G(r)$ für die Abstände zwischen nächsten Nachbarn (Interpretation siehe Text). Links ist der Graph für die Kiesgrube, rechts der für die Halde dargestellt. Die schwarzen Linien bezeichnen die empirischen Summenhäufigkeitsfunktionen. Die gepunkteten blauen Linien stehen für die bei Zufall zu erwartenden Werte und die gestrichelten blauen Linien begrenzen dessen maximale Schwankungsbreiten.

Wie zu erwarten, zeigen die Graphen für $G(r)$ (Abb. 2.17.), dass sich die *Verteilungen der Abstände* der nächsten Nachbarn hochsignifikant vom Zufall unterscheiden. In der Kiesgrube gilt dies für Abstände zwischen 0,4 m und 1,8 m, in der Halde liegt dieser Bereich zwischen 0,3 m und 1,85 m.

Beide Male steigt die Kurve zunächst kaum an, d. h., es gibt fast keine Schächte, die sich weitestgehend überschneiden. Bei genauerem Hinsehen allerdings erkennt man bereits in diesem unteren Abschnitt einen deutlichen Unterschied.

Der Graph für die *Kiesgrube* beginnt ab etwa 0,9 m, immer stärker anzusteigen. Es treten also kontinuierlich immer mehr Fälle auf, je größer der Abstand wird. Die Irrtümer bei der Platzierung durch Abteufen einzelner Schächte in Überschneidung mit Vorgängern oder die Verletzung der Sicherheitsabstände sind demnach sehr selten. Erst bei einem Abstand, bei dem sich alte und neue Schächte kaum noch berühren, ein Platzierungsirrtum in der Praxis also nur noch schwer zu erkennen ist, schwillt die Zahl nächster Nachbarn stark an.

Gleiches gilt prinzipiell für die *Halde*. Nur hier verläuft der Graph zunächst sogar noch flacher um dann zwischen 0,65 m und 0,9 m quasi einen Sprung zu machen. Anschließend ist der Graph dann bis 1,1 m wieder waagrecht – es treten also keine Abstände der Länge von 0,9 m bis 1,1 m auf. Eine vergleichbare Stufe liegt in der Kiesgrube erst bei 1,25 m bis 1,3 m. Zudem fällt sie wesentlich kleiner aus.

Dieser diskontinuierliche Verlauf erlaubt es, den Bereich der Abstände zu bestimmen, die auf *fehlerhafte Schachtplatzierungen* zurückgehen. Während in der Kiesgrube überhaupt nur selten größere Fehler gemacht wurden, sind sie in der Halde wesentlich häufiger. Besonders interessant ist es vor diesem Hintergrund, dass in der Halde beim Graphenverlauf die gleiche Stufe wie in der Kiesgrube auftaucht! Auch hier gibt es keine Abstände zwischen 1,25 m und 1,3 m. In beiden Graphen lassen sich dadurch die links davon liegenden Bereiche abtrennen. Bei kleineren Abständen wurden neue Schächte irrtümlicherweise zu nah an alte gerückt. Grundsätzlich waren also Abstände unter 1,25 m nicht beabsichtigt. Setzt man den Durchmesser eines Schachtes zur Zeit seiner Ausbeutung mit etwa 1 m an, so wollte man also keinesfalls näher als 0,25 m an einen Vorgänger heranrücken. Und selbst diese Abstände sind so selten, dass sie eigentlich die Ausnahme bilden. In der Halde erlag man aber wesentlich häufiger schweren Irrtümern. Der Graph der Halde zeigt, dass in einer Verteilung, die der Kiesgrube zunächst extrem ähnlich war, später weitere Schächte angelegt wurden, die zu der zusätzlichen Stufe bei 0,8 m führten. Weil man versuchte, so dicht wie möglich an bereits bestehende Schächte heranzurücken, erhöhte sich einfach die Fehlerquote.

In der *Kiesgrube* verläuft der Graph nach 1,3 m kontinuierlich weiter steil nach oben. Bei 1,78 m erscheint eine kleine Stufe. Danach beginnt er ab 1,85 wieder zu verflachen um bei 1,9 m nochmals eine deutliche Stufe aufzuweisen. Hier unterscheidet sich der Verlauf nicht mehr von einer Zufallskurve, die Stufen sind trotzdem eine interessante empirische Beobachtung.

Bei der Anlage neuer Schächte in der Kiesgrube plante man meist mit Abständen, die kaum unter 1,78 bzw. 1,9 m lagen. Nach einem kurzen Wiederanstieg folgt eine weitere Stufe bei etwa 2,05 m. Das spricht für die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Regelabstände bei den Planungen. Weitere Stufen bei 2,15 m bis 2,2 m sowie 2,25 m bis 2,3 m zeigen, dass es auch mehrere Obergrenzen für die (geplanten) Abstände gab. Größere Abstände zu den nächsten Nachbarn waren kaum beabsichtigt.

Der Verlauf des *Haldengraphen* weist bei 1,4 m ein weitere Stufe auf. In Verbindung mit seinem bisherigen Verlauf erlaubt dies sogar, die Charakteristik der späteren Störungen genauer zu bestimmen. Beim späteren Schachtbau zwischen (!) den Schächten der ersten Abbauphase riskierte man es, mit Abständen zu planen und zu arbeiten, die nur wenig über dem Minimum von 1,3 m lagen. Man ‘quetschte‘ also förmlich weitere Schächte zwischen die Vorgängerbaue. Die nächste Stufe liegt zwischen 1,74 und etwa 1,82. Hier besteht wiederum große Ähnlichkeit zwischen beiden Verteilungen. Bei der ursprünglichen Nutzung der Halde hatte man also zunächst ganz ähnliche Regelabstände benutzt. Die Abstände zwischen nächsten Nachbarn lagen in der ersten Abbauphase wenig unter 1,74 m. Dieser Wert fällt um nur 0,09 m kleiner aus als in der Kiesgrube. Dieser Unterschied könnte angesichts der Methodenungenauigkeit sogar noch kleiner sein (s. o. 2.3. und vgl. u.).

Andererseits gibt es einen *Unterschied* zwischen beiden Flächen, der eine gute Erklärung für diese kleine Differenz von 0,09 m liefert. Im Bereich der Halde wurde das Flöz regelhaft in nur etwa 4 m Tiefe angetroffen, die Abstände konnten also etwas geringer sein. In der Kiesgrube erreichen die Schächte dagegen Tiefen von bis über 8 m. Je tiefer zwei nahe beieinander liegende Schächte waren, desto instabiler war aber potentiell das zwischen ihnen liegende Gebirge. Desto größer musste folglich auch der Abstand zwischen ihnen sein. Wenn dies die Erklärung für das erörterte Phänomen ist, dann passten die Bergleute sogar ihre Planung dem jeweiligen Untergrund an. Das spricht deutlich dafür, dass *immer wieder dieselben Gruppen auf das Bergwerk zurückkehrten* und ihr bis dahin gewonnenes Vorwissen stets aufs Neue umsetzten.

Die Graphen für $G(r)$ zeigen, wie informationsreich die Verteilung aller Abstände zwischen den nächsten Nachbarn, auch Nachbarn erster Ordnung genannt, sein kann. Die Punktfeldstatistik ermöglicht noch die Erstellung ähnlicher Graphen, bei der die Abstände der Punkte zu ihren zweit- bis x-nächsten Nachbarn analysiert werden können. Auf diese Möglichkeit wurde hier verzichtet, da die weiter unten behandelte Paarkorrelationsfunktion ähnliche Informationen liefert. Für Analysen dieser Art ist die Software ‘CRIMESTAT III‘ geeignet (LEVINE 2004, 5.8ff.).

Die *Freiflächenfunktion* $F(r)$ (BADDELEY/TURNER 2005, 16: Funktion „empty space function“; Dies. 2006, 17ff: Funktion „*Fest*“; DIGGLE 2003, 21ff., 46 und 60ff.; UPTON/FINGLETON 1985, 54ff., 79ff., bes. 81 und 82 Figure 1.35) wird im Deutschen auch als sphärische Kontaktverteilungsfunktion $H(r)$ bezeichnet (STOYAN/STOYAN 1992, 269f.). Ihre Vorgehensweise ist nicht mehr so einfach nachvollziehbar, weil hier die Argumentation stärker auf stochastischem Denken beruht.

Diese Funktion ist besonders hilfreich, wenn man die *Lückengrößen* zwischen den Punkten analysieren möchte. Den Ausgang bildet das Einsetzen eines weiteren, zufällig platzierten Punktes v zwischen den bisher vorhandenen. Um diesen neuen Zufallspunkt v zieht man solange Kreise mit immer größerem Radius r , bis einer der bereits vorhandenen Punkte erfasst wird. Der Graph zeigt also die Wahrscheinlichkeit dafür, wieviel Prozent aller zufällig platzierten, leeren Kreise einen Radius von kleiner oder gleich r haben. Oder anders formuliert, mit welcher Wahrscheinlichkeit treten Kreise mit einem maximalen Durchmesser von $2r$ auf, in die gerade ein Punkt des Feldes fällt (DIGGLE 2003, 46). Man betrachtet also speziell die Größe der Lücken zwischen den Ausgangspunkten. Da zur Ermittlung des empirischen Graphen die Fläche mit einem feinen quadratischen Raster aus mehreren tausend Zufallspunkten überzogen wird (BADDELEY/TURNER 2006, 17f: Parameter „*eps*“; vgl. DIGGLE 2003, 21), liegen ausreichend Lücken vor, um einen kontinuierlich verlaufenden Graphen zu erzeugen. Im Gegensatz zum empirischen Graphen der Abstände zwischen den nächsten Nachbarn weist er keinerlei Stufen oder stärkere Knicke auf (vgl. o. 2.17). Die zugehörige Funktion lautet (BADDELEY/TURNER 2006, 17: Funktion „*Fest*“):

$$F(r) = 1 - e^{-(\lambda * \pi * r * r)} .$$

Die Auswertung dieser Funktion ist gerade im Hinblick auf *Bergbauaktivitäten späterer Phasen* in einem bereits mit Schächten überzogenen Bereich besonderes interessant. Hier konnte ja ein solcher Fall, die Platzierung eines weiteren Objektes in der Lücke zwischen bereits vorhandenen Punkten, wirklich eintreten! Wenn dies häufiger geschah, sollte sich im Vergleich mit einem ungestörten Areal ermitteln lassen, auf welche Weise man bei diesen nachträglichen Aktivitäten vorging. Daneben kann der Vergleich mit einem Zufallsprozess herangezogen werden, um auch von dieser Seite Informationen über das Punktfeld zu erhalten. Liegen die Werte des empirischen Graphen signifikant über denen des theoretischen, so spricht dies dafür, dass regelhaft Lücken mit den entsprechenden Kreisradii r vorhanden sind (UPTON/FINGLETON 1985, 81). Anders gesagt, zwischen den Punkten sind bestimmte Regelabstände vorhanden, die sich hier als spezifische Lückengrößen bemerkbar machen.

Unterschreitet der empirische den theoretischen Graphen, so weist dies auf ein Areal hin, in dem die Schächte so zusammengedrängt sind (“clustered“), dass zwischen ihnen gerade noch Kreise mit dem jeweiligen Radius r Platz fänden. Wie bei $G(r)$ bedeutet auch bei $F(r)$ ein steiler Anstieg, dass sehr viele Lücken von dieser Größenordnung vorhanden sind.

Für die *Interpretation* von $F(r)$ muss man sich einige Aspekte vergegenwärtigen. Man sollte nicht vergessen, dass kreisförmige Lücken nur sehr selten den freien Flächen zwischen genau zwei benachbarten Schächten entsprechen. Stattdessen handelt es sich um die Freiflächen zwischen mindestens drei, meist aber mehr Schächten, die gemeinsam ein Dreieck bzw. ein mehr-eckiges Polygon begrenzen. Wenn sich also Ergebnisse für die regelhaften Aspekte der Schachtverteilungen ergeben, die nicht zu den bisherigen Resultaten passen, ist dies darin begründet, dass unterschiedliche Verteilungseigenschaften betrachtet werden. Beim Abstand der nächsten Nachbarn ging es um direkte Verbindungen zwischen den Punkten auf dem kürzesten Weg. Bei den Freiflächen geht es um die besagten Lücken, die sich wie gesagt in einer anderen Beziehung zu den Punkten befinden. Man fasst also die Regelmäßigkeit der Schachtverteilung auf unterschiedliche Weise. Die Resultate der beiden Methoden können jedoch verbunden werden. Die nächsten Nachbarn spiegeln direkt einen Aspekt des maximal angestrebten (regelhaften) Aneinanderrückens der Schächte wider. Mit den Freiflächen dagegen erfasst man eher die Situation, die am Ende des Bergbaus vorlag. Kombiniert man beide, ist es möglich zu beurteilen, ob nach neolithischen Maßstäben noch “Platz“ zwischen den vorhandenen Schächten war bzw. wie dieser Platz zuvor genutzt wurde.

Bei der folgenden Diskussion werden grundsätzlich die Durchmesser der kreisförmigen Lücken ($2r$) verwendet! Für die Überprüfung einer Aussage am Graphen ist daher zunächst der jeweils angegebene Wert zu halbieren. Dieses Vorgehen wurde eingeschlagen, da man sich eine kreisrunde Fläche mit einem bestimmten Durchmesser besser vorstellen kann, als wenn man sich zunächst den Kreis über seinen Radius erschließt.

Bei beiden Flächen (**Abb. 2.18**), Kiesgrube wie Halde, zeigen die *Graphen der Freiflächenfunktion* die erwartete hochsignifikante Abweichung vom Zufall. Beide Male geht – wie nach den bisherigen Ergebnissen zu erwarten – diese Abweichung auf die Existenz von Regelmäßigkeiten zurück.

Im Fall der *Kiesgrube* sind die regelhaft auftretenden Lücken zwischen 1,4 m und 3,8 m groß. Von den Lücken sind 90 % kleiner als etwa 2,9 m. Die größten erreichen 5,6 m. Der Graph steigt zwischen etwa $r_1 = 0,6$ m und $r_2 = 1,05$ m besonders steil an. In der Kiesgrube besitzen demnach die meisten Freiflächen einen Durchmesser von 1,2 m bis 2,10 m.

Es gibt einige wenige Lücken (ca. 2 %; zwischen 3,8 m und 5,6 m) in die nach dem bisher Gesagten noch weitere Schächte hineinpassen würden, ohne (!) dass dabei Regelabstände verletzt würden. Allerdings gehen einige dieser Lücken wahrscheinlich auf die Doline im zentralen nördlichen Randbereich zurück (vgl. u. 2.3.), und sind deshalb als Ausnahme zu betrachten. Zudem wirkt sich hier die Grenzziehung am Südrand des Bergwerkes auf die Größe möglicher freier Flächen zwischen den Schächten aus.

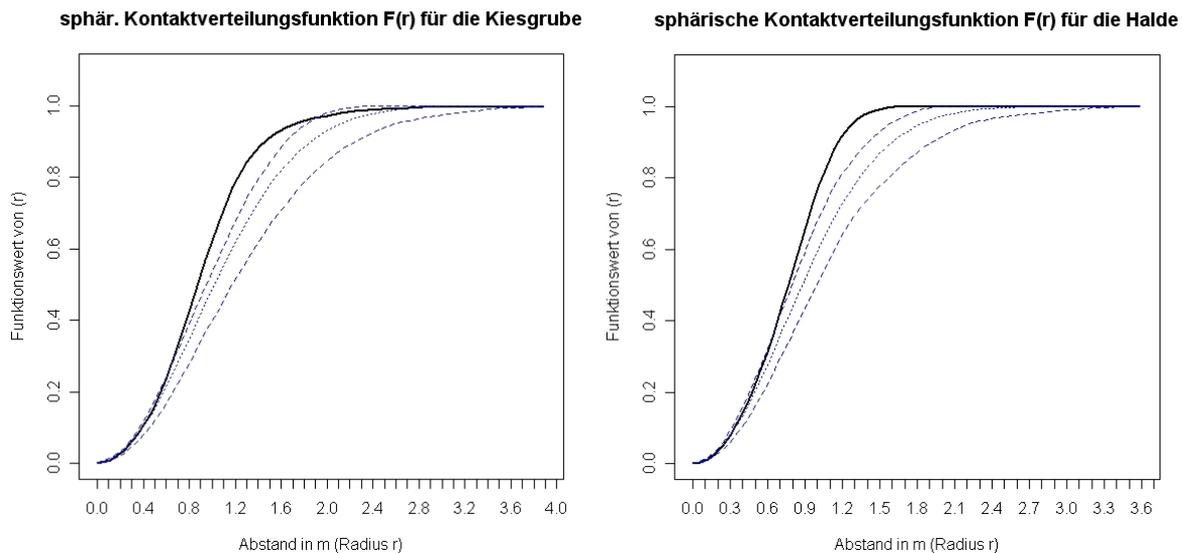


Abb. 2.18: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik. Wahrscheinlichkeitsfunktion $F(r)$ für die Abstände zwischen zusätzlichen Zufallspunkten und den Schachtmittelpunkten, die sog. "sphärische Kontaktverteilungsfunktion" (Interpretation siehe Text). Links ist der Graph für die Kiesgrube, rechts der für die Halde dargestellt. Die schwarzen Linien bezeichnen den empirischen Funktionsverlauf. Die gepunkteten blauen Linien stehen für die Graphenkurve von Zufallsverteilungen. Zwischen den gestrichelten blauen Linien liegt der Schwankungsbereich des Zufalls.

In der *Halde* liegen dagegen gar keine Lücken vor, die größer als 3,2 m sind. Über 90 % sind sogar kleiner als 2,4 m. Die Größe der regelhaften Lücken bewegt sich zwischen 1,5 m und 3,2 m. Der steilste Abschnitt des Graphen liegt zwischen den Werten $r_1 = 0,6$ m und $r_2 = 0,95$ m. Es sind also Lücken von 1,2 m bis 1,9 m besonders häufig. Bemerkenswert ist zudem der leichte Knick des empirischen Graphen bei $r = 1$ m. So etwas kann nur auftreten, wenn das zugrundeliegende Phänomen extrem stark ausgeprägt ist. Es gibt also sehr viele Lücken, die maximal 2 m Durchmesser erreichen.

Die in beiden Flächen gleiche *Untergrenze* (1,2 m) bei der Gruppe der regelhaften Lücken könnte durch dasselbe Phänomen bedingt sein. Oben wurde bereits auf die neolithischen Fehler beim Plazieren eines Schachtes hingewiesen. Im Folgenden wird versucht, ihre Ursache zu ergründen.

Beim Abteufen eines neuen Schachtes gab es prinzipiell zwei Möglichkeiten, die Anwesenheit eines Vorgängers zu bemerken, wenn man ihn nicht schon an der trichterförmigen Mulde in der Oberfläche erkannt hatte. Entweder sah man ihn beim Freiräumen der Fläche für den neuen Schacht. Dann hatte man wie beim Lokalisieren anhand der Trichtermulde noch die Möglichkeit, den Neuen in entsprechendem Abstand anzulegen. Wurde er jedoch auch hier übersehen, konnte man nur noch beim Beginn des Abteufens bemerken, dass man auf gestörtem Untergrund arbeitete. Dafür mussten sich jedoch Toter Mann (alter Schacht) und neuer Schacht deutlich überlappen. Wenn man nun davon ausgeht, dass die Durchmesser der Schächte nahe der Oberfläche in der Regel 1,2 m (also Radius 0,6 m) nicht überschritten, konnte man den Platzierungsfehler nur bemerken, wenn der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des alten und dem des neuen Schachtes kleiner als 1,2 m ($2 \times \text{Radius } 0,6 \text{ m}$) war. Ansonsten lag keine Überschneidung vor, weshalb man den Platz für geeignet hielt und weiter arbeitete. Mit dieser Begründung kann man also erklären, weshalb der Wert 1,2 m in beiden Teilflächen auftritt. Die Grenze für nicht entdeckte Fehler schlug sich jeweils in der gleichen Art und Weise nieder.

Dass die *Obergrenze* der regelhaften Lücken mit der maximalen Größe für Freiflächen zusammenfällt zeigt, dass hier in der Halde jede Möglichkeit zur Anlage eines Schachtes ausgenutzt wurde. Dabei ging man mit einer Systematik vor, die schließlich dazu führte, dass die Größe der verbliebenen Lücken regelhaft bei maximal etwa 3,2 m lag. Geht man davon aus, dass das Muster in der Halde ursprünglich dem in der Kiesgrube entsprach, später aber noch einmal gestört wurde, kann man aus den Unterschieden in der Lückengröße folgende Interpretation ableiten. In der Halde wurden auf allen größeren Freiflächen, die dies irgendwie erlaubten, noch Schächte angelegt.

Verbindet man dies mit dem Befund aus der Analyse von $G(r)$, wonach man wohl meistens mit Mindestabständen plante, die maximal etwa 1,74 m bis 1,78 m groß waren, kann man sogar die Obergrenzen der Zugeständnisse beim Anlegen späterer Schächte schätzen. Wenn man alle Lücken mit mehr als 3,2 m Durchmesser noch schloß, bedeutet dies, dass man mit den Regelabständen auch bis auf nur etwa 1,6 m heruntergehen konnte, was etwa einem Abstand von 0,4 m zwischen den Wänden des alten und des neuen Schachtes entsprach. Man war also bereit, mindestens 0,14 m bis 0,18 m näher an bestehende Schächte zu rücken ($1,74 \text{ m} - 1,6 \text{ m} = 0,14 \text{ m}$; bzw. analog 0,18 m bei 1,78 m), als man das sonst im Regelfall tat. Wahrscheinlich liegen diese Margen jedoch noch höher.

Die unterschiedliche Wahrscheinlichkeit für *Lücken bis 2,4 m* Größe erlaubt sogar eine Schätzung, wie viele Schächte in der Halde bei späteren Aktivitäten angelegt worden sein könnten. So sind in der Halde 90 % der Lücken kleiner als 2,4 m.

In der Kiesgrube trifft dies aber nur auf knapp 80 % zu, also etwa 10 Prozentpunkte weniger. Bei den nachträglichen Aktivitäten wurden demnach noch einmal 12,5 % (Zuwachs von 80 auf 90 Prozentpunkte) der bereits bestehenden Freiflächen durch weitere Eingriffe verkleinert. Beim Versuch, nachträglich auf einer bereits abgebauten Fläche noch einmal Platz für einen weiteren Schacht zu finden, waren die Chancen also gar nicht so schlecht.

Die *Hazardrate* $\lambda(r)$ für die sphärische Kontaktverteilungsfunktion vermittelt einen Eindruck von besonders markanten Entwicklungen bei den Lückengrößen. Auf ihre Mathematik wird hier nicht im Detail eingegangen (weiterführend dazu BADDELEY/TURNER 2006, 18). Die Formel lautet:

$$\lambda(r) = - (d / dr) * \ln (1 - F (r)).$$

Dabei ist d die Zunahme des Funktionswertes in einem Abschnitt des Graphen $F(r)$ zwischen den X-Werten r_1 und r_2 , wobei $dr = r_2 - r_1$. Anders gesagt, es handelt sich bei $\lambda(r)$ um ein Produkt, in das die Steigung von $F(r)$, denn das wird ja durch den Ausdruck d/dr vermittelt (frdl. Mitt. Prof. Dr. Dietrich STOYAN), und ein auf $F(r)$ aufbauender Logarithmus eingehen. Ausschläge der Hazardrate treten bei solchen r auf, wo von den bis dahin noch vorhandenen Lücken besonders viele ‘verschwinden‘. Wenn bei $r - 1$ noch viele Lücken vorhanden sind, nach dem Schritt ‘+ 1‘ beim Wert r aber deutlich weniger übrigbleiben, dann erfolgt bei diesem r ein Ausschlag. Damit reagiert $\lambda(r)$ besonders sensibel auf leichte Veränderungen bei der Häufigkeit von Lücken. Ausschläge dieses Funktionsgraphen weisen daher auf sehr starke Regelmäßigkeit im jeweiligen Punktfeld hin (frdl. Mitt. Prof. Dr. Adrian BADDELEY). Aus der Formel ergibt sich, dass die Hazardrate $\lambda(r)$ nur maximal bis zu einem r_x dargestellt werden kann, bei dem $F(r_x)$ gerade noch kleiner als 1, denn der natürliche Logarithmus von Null ist nicht definiert. Danach setzt die Software den Graphen aus mathematischen Gründen auf Null. Der jeweilige Abfall am ‘Ende‘ der Graphen ist also kein empirischer Befund. Entscheidend ist jedoch, dass der Verlauf im Wesentlichen wieder auf die unterschiedliche Häufigkeit von Lücken verschiedener Größe zurückgeht.

Wie nach den bisherigen Ergebnissen nun schon zu erwarten, zeigen die Graphen für beide Untersuchungsflächen deutliche und hohe Ausschläge (**Abb. 2.19**). Sowohl in der Kiesgrube als auch in der Halde liegt also eine extrem starke Regelmäßigkeit bei der Verteilung der Schächte vor.

Der Graph für die *Kiesgrube* besitzt interessanterweise nicht einen, sondern mehrere Ausschläge. Die Größe dieser Ausschläge liegt dabei in etwa zwischen den Funktionswerten von 1,5 und 3. Dabei erreicht der letzte Ausschlag einen Maximalwert von ca. 7.

Die Regelmäßigkeit, die sich in der sphärischen Kontaktverteilungsfunktion bzw. deren Hazardrate niederschlägt, geht also nicht auf eine, sondern auf mehrere regelhaft auftretende Größen bei den Lücken zurück. Das entspricht dem oben bei den Abständen der nächsten Nachbarn festgestellten Auftreten mehrerer Mindest- bzw. Regelabstände. Die Kurve verläuft zunächst monoton steigend, um bei $r = 1,18$ m einen ersten deutlichen Knick aufzuweisen. Hier findet sich der Wert (1,2 m) wieder, der oben schon bei $F(r)$ als Obergrenze für leicht erkennbare Platzierungsfehler angesprochen wurde. Der erste Gipfel des Graphen liegt dann bei 1,3 m. Es folgen weitere bei den r -Werten 1,53 m, 1,88 m, 2,12 m, 2,35 m und 2,6 m sowie 2,85 m. Die Regelmäßigkeit geht also vor allem auf Lücken dieser Größen zurück.

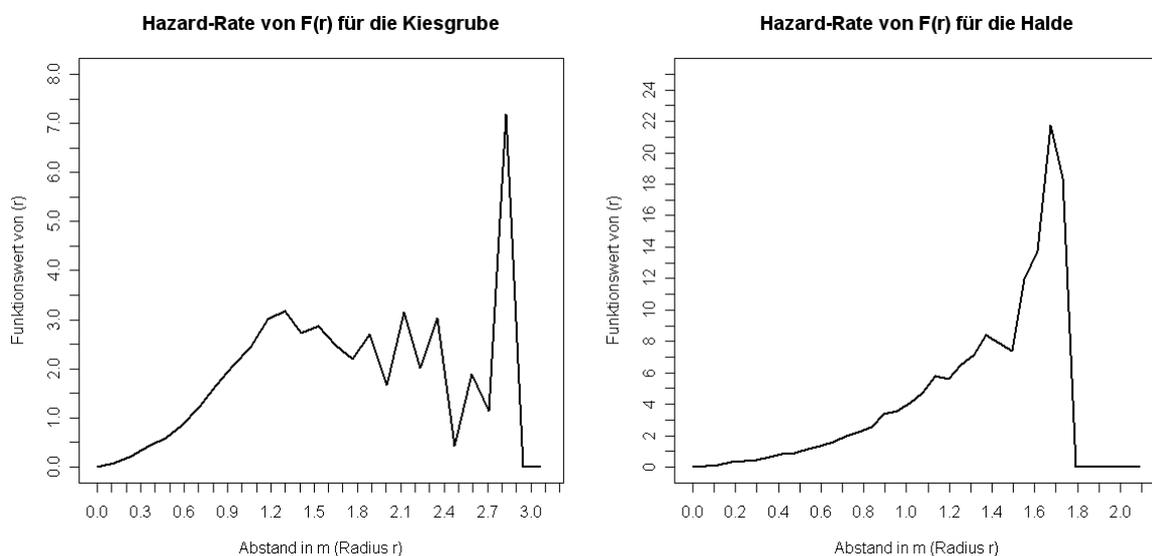


Abb. 2.19: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik. Hazardrate $\lambda(r)$ der sphärischen Kontaktverteilungsfunktion (Interpretation siehe Text). Links ist der Graph für die Kiesgrube, rechts der für die Halde dargestellt.

Betrachtet man die Werte näher, zeigt sich ein neuer, überraschender Aspekt. Die *Schrittweite* zwischen den einzelnen Gipfeln ist beinahe zwischen allen gleich groß! Die Liste der Abstände zwischen den Gipfeln des Graphen (0,23 m, 0,25 m, 0,24 m, 0,24 m, 0,25 m und 0,25 m) weist eine erstaunliche Einheitlichkeit auf (Variationskoeffizient 3,3!), die mit einem Maß von etwa 0,243 m verbunden ist. Nur der Abstand zwischen dem ersten Knick (1,18 m) und dem ersten Gipfel (1,13 m) fällt mit 0,12 m beinahe halb so groß aus. Dass sich diese Größe hier so deutlich zeigt, ist nach den bisherigen Beobachtungen kein Zufall. Die weitere Untersuchung wird noch andere Argumente dafür liefern.

Festzuhalten ist, es werden gleich *zwei Verteilungseigenschaften* deutlich.

Neben dem Beweis extrem starker Regelmäßigkeit ist zu beobachten, dass es eine gleichmäßig abgestufte Reihe aus Gruppen regelhafter Lückengrößen gibt!

Diese regelmäßige Stufung von 0,243 m ist noch um einige Zentimeter zu verringern, wenn man sie mit den Abständen zwischen den Schächten in Verbindung bringen will. Schließlich geht $F(r)$ auf die Lücken und nicht die eigentliche Schachtabstände zurück – und die Lücken liegen ja selten genau zwischen nur zwei Schächten. Die Statistik wurde zwar mit einem feinen, aber doch endlichen Raster von Zufallspunkten erzeugt. Bei diesem Raster kann man nicht annehmen, dass Zufallspunkte genau zwischen zwei Schächten lagen. Deshalb fallen die Radien für die leeren Kreise immer etwas größer aus als die Schachtabstände, die hinter diesem Phänomen stehen. Sollte es sich also hier um einen Hinweis auf eine bei der Planung verwendete Maßeinheit handeln, müsste diese aufgrund des Auflösungsvermögens der Methode einige Zentimeter kleiner als die Größe der Stufen (0,243 m) sein.

Der Graph für die *Halde* zeigt drei Gipfel. Davon ist jedoch nur der letzte deutlich vom Rest abgesetzt. Die Ausschläge nehmen hier mit größer werdendem r jeweils noch stark zu. Liegt der Erste noch bei 5,8, folgen die anderen bei 8,2 und schließlich 22. Die Regelmäßigkeit zeigt sich hier vor allem beim letzten Ausschlag. Wie bei der Kiesgrube so ist auch in der Halde eine Reihe von mehreren regelhaft auftretenden Größen bei den Lücken für den Befund verantwortlich. Die Gipfel des Graphen liegen bei den r -Werten 1,13 m, 1,37 m und 1,68 m. Ihnen voran geht ein Knick bei 0,9 m, dessen Ausschlag immerhin schon 3,5 erreicht. Allerdings sind Gipfel und Knicke nur sehr schwach ausgeprägt. Zwischen den Marken (0,9 m, 1,13 m, 1,37 m und 1,68 m) findet sich zweimal (0,23 m und 0,24 m) das bereits erkannte Stufenmaß von etwa 0,24 m. Der letzte Stufenabstand (0,31 m) kann nicht mit den bisherigen Resultaten verbunden werden.

Festzuhalten ist jedoch: Auch hier ist die Regelmäßigkeit von einer Reihe jeweils etwa gleich großer Lücken verursacht, wobei sich wiederum das oben erkannte Stufenmaß findet. Die über die Lückengröße feststellbare Einheitlichkeit in der Halde geht vor allem auf Lücken zurück, deren Radius 1,61 m bis 1,76 m beträgt. Sie sind der eigentliche Grund für die Regelmäßigkeit.

Die von *Van Lieshout und Baddeley* vorgeschlagene punktfeldstatistische Funktion $J(r)$ ist eine Art Index (BADDELEY/TURNER 2006, 40: “*Jest*“). Er stellt ein äußerst feines Messinstrument für Regelmäßigkeiten dar. In Fällen wie den vorliegenden ist deshalb auch mit extremen Ausschlägen $J(r)$ zu rechnen (frdl. Mitt. Prof. Dr. Adrian BADDELEY). Das ist leicht verständlich. In die Formel gehen sowohl $G(r)$ als auch $F(r)$ ein. Erfassen beide bei einem bestimmten r Regelmäßigkeit, verstärkt sich dieser Effekt. Die Formel lautet:

$$J(r) = (1 - G(r)) / (1 - F(r)).$$

Aufgrund des *Indexcharakters* verläuft der Graph ab dem Punkt waagrecht, bei dem eine der beiden Funktionen ($G(r)$ oder $F(r)$) den Wert 1 erreicht. Der Graph setzt aus, sobald auch die zweite Funktion den Wert 1 annimmt – Null durch Null ist Null. Durch die Kombination der beiden Funktionen ist der reale Bezug der bei einem gewissen r festgestellten Regelmäßigkeit etwas schwerer vorstellbar. Wie die Formel zeigt, misst die Funktion eine Art Verhältnis zwischen Abständen der nächsten Nachbarn und Lückengrößen.

Der Graph für die *Kiesgrube* weist zwei Gipfel auf, die nicht innerhalb der Schwankungsbreite eines Zufallsprozesses liegen (**Abb. 2.20**). Der erste und bei weitem deutlichere der beiden liegt bei $r = 1,59$ m. Diesem Ausschlag von der Größe 8,3 folgt noch ein kleinerer von 4,6 bei $r = 2,09$ m. Nicht mehr überraschend ist der Abstand zwischen den beiden Gipfeln. Mit 0,5 m entspricht er beinahe exakt dem Doppelten der bei $\lambda(r)$ festgestellten Stufen (0,243 m).

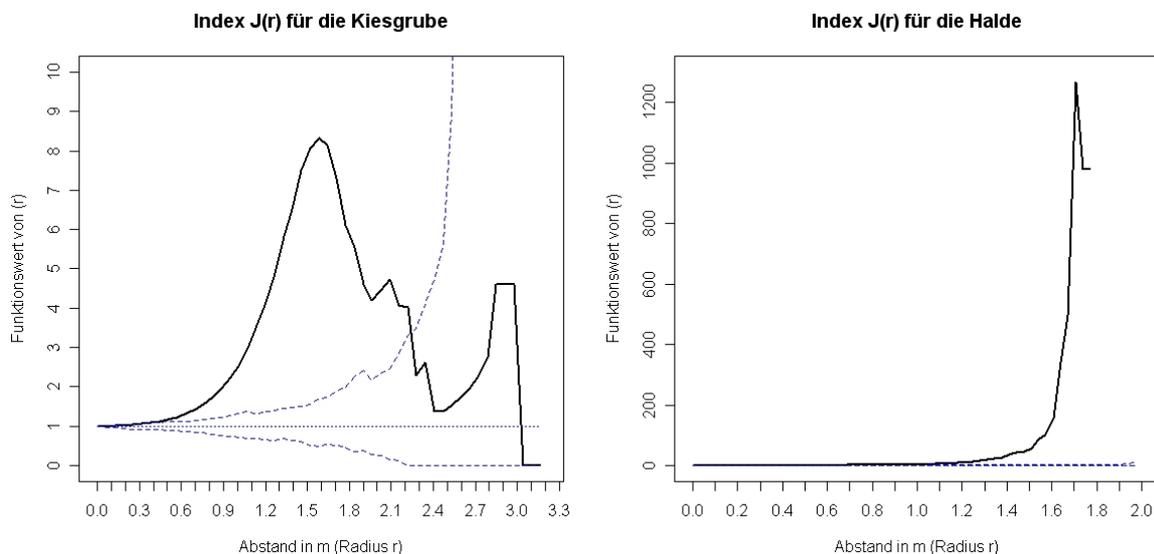


Abb. 2.20: Abensberg-Arnshofen - Punktfeldstatistik. Index $J(r)$ (Interpretation siehe Text).

Links ist der Graph für die Kiesgrube, rechts der für die Halde dargestellt. Die schwarzen Linien bezeichnen die empirischen Graphenkurven. Die gepunkteten blauen Linien stehen für den bei Zufall zu erwartenden Verlauf. Zwischen den gestrichelten blauen Linien können Beobachtungen zufällig sein. Man beachte Skala und Extremwert beim Haldengraphen.

Es folgen noch zwei Gipfel, bei 2,32 m und bei 2,85 m bis 3,0 m, die schon innerhalb der Schwankungsbreite eines Poissonprozesses liegen und daher nicht mehr zweifelsfrei Zeichen einer Regelmäßigkeit sind. Das Plateau des zweiten Gipfels ist durch den Grenzwert von $F(r)$ verursacht (vgl. o. Abb. 2.18 links).

Beim Graph der *Halde* zeigt sich nur ein einziger Gipfel. Dieser aber entspricht der oben geäußerten Vermutung, die Funktion könne auf extreme Weise reagieren.

Bei $r = 1,72$ m schnellt die Kurve auf einen Funktionswert von ca. 1240 hinauf. Das unmittelbar darauffolgende kurze Plateau dürfte wieder dem Erreichen eines Grenzwertes geschuldet sein. Das Maximum dagegen steht vermutlich mit der bei $G(r)$ bemerkten Stufe bei $r = 1,74$ m in Zusammenhang. Auch dass die größten Lücken regelhaft den Radius von etwa 1,6 m erreichen, könnte zu dem extrem hohen Ausschlag geführt haben.

Wie bereits vermutet, erwies sich die Funktion $J(r)$ als zu sensibel für die durch mehrere Methoden bereits festgestellte extreme Regelmäßigkeit. Möglicherweise ist sie besser für siedlungsarchäologische Anwendungen geeignet, bei denen Regelabstände häufig nicht so deutlich ausfallen, da sie stark von geographischen Faktoren beeinflusst sein können. Für die Halde ist die Sensibilität von $J(r)$ einfach zu hoch – als würde man mit einem Stethoskop Schienen abhören, auf denen gerade ein Zug vorbeifährt.

Die nächste Funktion ist wohl die *wichtigste punktfeldstatistische Methode*. Nach ihrem Urheber Brian D. Ripley wird sie in der Regel als ‘*Ripleys K*’ bezeichnet (BADDELEY/TURNER 2006, 54ff.; CONOLLY/LAKE 2006, 166ff.; DIGGLE 2003, 21ff., 46ff. und 56ff.; LEVINE 2004, 5.20ff.; PREISS 2006, 62ff.; RIPLEY 1981, 158ff. und 169ff.; STOYAN/STOYAN 1992, 270ff.; UPTON/FINGLETON 1985, 87ff.).

Es handelt sich um eine sogenannte Größe zweiter Ordnung (zur Bezeichnung vgl. STOYAN/STOYAN 1992, 271f.). Eine einfache Deutung dieser Funktion ergibt sich, wenn man $K(r)$ mit der Punktdichte λ (s. o.) multipliziert (STOYAN/STOYAN 1992, 270; UPTON/FINGLETON 1985, 87):

$$\lambda * K(r) = [\text{Anzahl der zu erwartenden Punkte in einem Kreis von Radius } r].$$

Man erhält schlicht die Zahl der Punkte, die beim jeweiligen Prozess in einem Kreis von der Fläche $r^2 * \pi$ zu erwarten wären. Die empirische Funktion wird geschätzt, indem man um jeden Punkt des Punktfeldes einen Kreis mit Radius r zieht und die Punkte zählt, die außer ihm in diesem Kreis liegen (STOYAN/STOYAN 1992, 270). Teilt man diesen Wert durch die Punktdichte λ , erhält man die Schätzung von Ripleys K für den Radius r . Dieses Vorgehen wird für einen stetig größer gewählten r -Wert wiederholt. Leicht einsichtig ist (vgl. PREISS 2006, 64 Figure 4.3), dass eigentlich die Abstände zwischen den Punkten für den Funktionswert verantwortlich sind. Erreicht der Kreisradius eine Größe, die dem Abstand zwischen dem Ausgangspunkt und einem weiteren Punkt entspricht, ändert sich der Wert $K(r)$.

Da hier die Abstände zwischen allen Punkten eines Punktfeldes bis zu einer wählbaren Obergrenze berücksichtigt werden (PREISS 2006, 72; UPTON/FINGLETON 1985, 88), beinhaltet diese Statistik ein extrem hohes Maß an Information über das jeweilige Punktfeld.

Sie erlaubt daher einen sehr guten Einblick in die jeweilige Verteilung. Neben den oben ausgewerteten Abständen der nächsten Nachbarn gehen hier beispielsweise auch die Abstände der direkt und indirekt benachbarten Punkte in die Auswertung ein. Der Verlauf von $K(r)$ ist also eine extrem aussagekräftige Statistik. Bei einem Zufalls- bzw. Poissonprozess ist der theoretisch zu erwartende Wert $K(r)$ gegeben durch:

$$K(r) = \pi * r^2.$$

Aus Gründen der Anschaulichkeit wird hier eine von Spezialisten empfohlene *transformierte Darstellung* der Funktion $K(r)$ gewählt (CONOLLY/LAKE 2006, 166ff.), die gemeinhin als $L(r)$ bezeichnet wird. Leider wird diese Bezeichnung in der mathematischen Literatur nicht einheitlich verwendet (DIGGLE 2003, 56f.: $D(r)$) und z. T. inhaltlich anders definiert (RIPLEY 1981, 160: $L(r) = (K(r) / \pi)^{1/2}$). Hier wird Upton und Fingleton folgend eine Transformation verwendet (dies. 1985, 87), welche zu der Standardisierung des Funktionswertes führt (PREISS 2006, 66; vgl. CONOLLY/ LAKE 2006, 167 oder LEVINE 2004, 5.23), die eine visuell besonders einfach verständliche Darstellung ergibt:

$$L(r) = (K / \pi)^{1/2} - r.$$

Setzt man obige Zufallserwartung ein, ergibt der Graph eines Poissonprozesses nach der Transformation eine waagrechte Linie, da er stets den Wert Null besitzt. Die Schwankungsgrenzen für diesen Zufallsprozess laufen oberhalb und unterhalb mehr oder weniger parallel zu dieser waagrechten Linie.

Die *Interpretation* des empirischen Graphen ähnelt den bisherigen Ansätzen und ist einfach nachvollziehbar (RIPLEY 1981, 169ff.; PREISS 2006, 67; UPTON/FINGLETON 1985, 82). Unterschreitet die empirische Kurve die Schwankungsgrenzen, bedeutet dies, es liegen weniger Abstände der Länge r vor, als bei einem Poissonprozess zu erwarten wären. Die Punkte "behindern" (inhibieren) sich gegenseitig in ihrem Auftreten; in unmittelbarer Nähe eines Punktes treten (fast) keine anderen auf. Ein solches Phänomen wird als Inhibition bezeichnet. Dieses Muster ist häufig bei punktfeldstatistischen Anwendungen zur Untersuchung von Pflanzenstandorten bzw. bei allen Objekten, deren Lage der Konkurrenz um bestimmte Ressourcen entspringt (UPTON/FINGLETON 1985, 87ff.). Die Regel, auf die die Verteilung der Objekte zurückgeht, führt zur Vermeidung von bestimmten Abständen. Es entsteht ein Muster mit regelhaften Mindestabständen. Der Graph sinkt in solchen Fällen unter die Schwankungsgrenze ab und pflanzt sich danach in dieser Position waagrecht nach rechts fort.

Der Wiederanstieg des Graphen signalisiert das Einsetzen der *regelmäßig auftretenden Abstände*. Je steiler er erfolgt, desto häufiger sind Abstände, die dem jeweiligen r -Wert entsprechen.

Treten bei einem solchen Anstieg Stufen oder gar wieder nach unten weisende Zacken auf, so gehören die mit den zugehörigen r verbundenen Abstände nicht im engeren Sinn zu den Regelabständen bzw. die Regel “kennt“ eine Reihe von mehreren Abständen. Letzteres führt zu einer Vermeidung der dazwischenliegenden Abstände; je stärker diese Vermeidung ausfällt, desto ausgeprägter wird der Effekt beim Graphen: Statt einer Stufe erscheint ein Zacken nach unten. Der Mindestabstand zwischen den Punkten liegt dort, wo der Graph von einem geraden, abwärts weisenden Verlauf abweicht. Dieser Wert ist als r_{min} zu bezeichnen.

Bei zusammengedrängten Ansammlungen (engl. ‘cluster’) von Punkten, sog. *Clustern*, überschreitet der Graph dagegen den Kanal für die beim Zufall zulässige Schwankungsbreite nach oben. Es gibt demnach sehr viele Abstände des Wertes, bei dem diese Überschreitung ihr Maximum findet; innerhalb der jeweiligen Cluster treten nämlich sehr viele Abstände ähnlicher Länge zwischen den Punkten auf. Und dies führt zu dem Ausschlag nach oben. Es kommen zwar auch in Zufallsverteilungen Bereiche vor, die Cluster zu sein scheinen (vgl. z. B. UPTON/FINGLETON 1985, 11 Figure 1.2; RIPLEY 1981, 144ff. und Fig. 8.1a). Aber erst, wenn eine “überzufällig“ große Zahl entsprechender Abstände vorhanden ist, handelt es sich um “echte“ Cluster und es kommt zum Überschreiten der Schwankungsgrenze. Prinzipiell gelten die zuvor für nach unten weisende Ausschläge beschriebenen Aspekte umgekehrt in analoger Weise für nach oben zeigende Ausschläge.

Im *Extremfall* eines völlig regelmäßigen Musters in der Art einer Bienenwabe (vgl. u. 2.1.5. Abb. 2.30) entsteht ein Graph, der einen Sägezahnverlauf aus diagonalen und senkrechten Liniensegmenten aufweist (PREISS 2006, 69 Figure 4.9). Dabei stechen die Spitzen oben und unten aus dem Zufallsschwankungskanal heraus. Man kann sich vorstellen, dass dann nur Regelabstände der Größe r und ihr Vielfaches vorliegen. Diese Abstände treten demnach “überzufällig“ häufig auf. Das Ergebnis sind die clusteranzeigenden Ausschläge nach oben bei diesen r -Werten. Alle anderen Abstände dagegen fehlen und bei diesen Werten zeigt der Graph entsprechend Ausschläge nach unten.

Für die Betrachtung von $L(r)$ wurde bei beiden Untersuchungsflächen ein maximaler r -Wert von 4 m gewählt (**Abb. 2.21**). Zum einen ist damit der Ausschnitt von nicht zufallsbedingten Abständen vollständig erfasst, zum anderen erlaubt der gleiche Maximalabstand einen exakten Vergleich der beiden Punktfelder.

Die Schachtabstände in der *Kiesgrube* unterscheiden sich bereits mit Beginn des interpretierbaren Graphenverlaufs vom Zufall. Bis zu $r = 2,1$ m sind sie seltener, als dabei zu erwarten. Es liegt also eindeutig eine Inhibition bzw. eine Verteilung mit regelhaften Abständen vor. Betrachtet man den Graphenverlauf genauer, kann man eine Reihe interessanter Details erkennen.

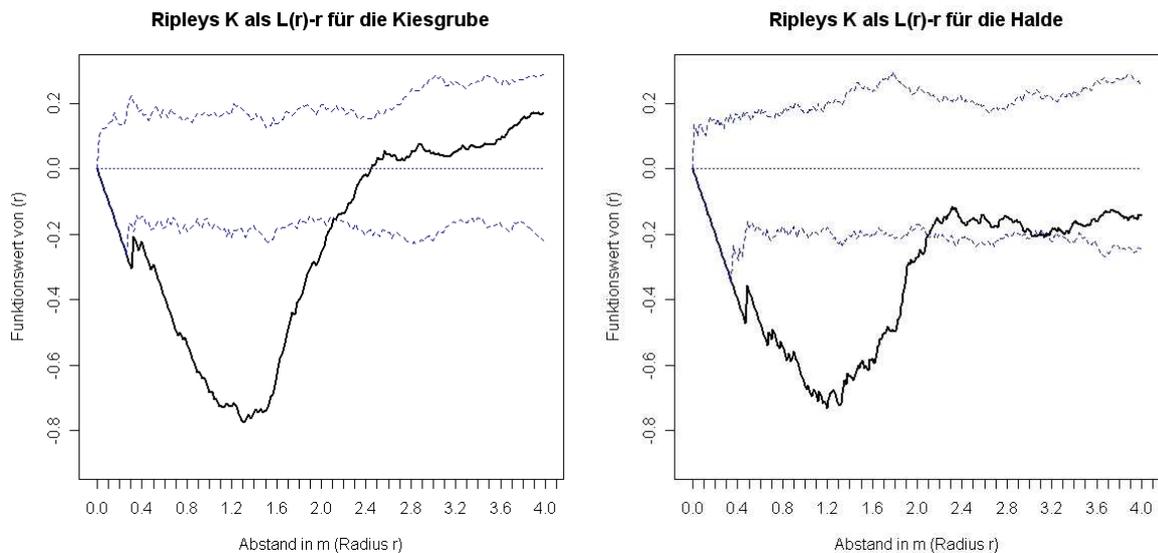


Abb. 2.21: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik. Ripley's K transformiert zu $L(r)$ (Interpretation siehe Text). Links ist der Graph für die Kiesgrube, rechts der für die Halde dargestellt. Die schwarzen Linien bezeichnen die empirischen Graphenkurven. Die gepunkteten blauen Linien stehen für die bei Zufall zu erwartenden Graphen – waagrechte Linien. Zwischen den gestrichelten blauen Linien befindet sich der Kanal möglicher Schwankungen des Zufalls.

Der erste ‘‘Sägezahn‘‘ des empirischen Graphen bei etwa 0,45 m geht auf erste Überschneidungen zwischen Schächten zurück. Danach fällt die Kurve abgesehen von einer kleinen Stufe bei 0,7 m steil ab, um bei 1,17 m die Sohle ihres Verlaufs zu erreichen. Diese Sohle befindet sich zwischen 1,08 m und 1,51 m. Der Ausschlag liegt hier durchschnittlich bei etwa $L(r) = -0,73$ und erreicht bei 1,3 m ein absolutes Minimum von $-0,77$. Wenn also die Schächte nicht aufgrund von Fehlern zu nah beieinander platziert wurden, versuchte man in der Regel, Abstände von weniger als 1,51 m zu vermeiden. Die oben bei 1,2 m Abstand beschriebene Grenze für die Erkennbarkeit von Platzierungsfehlern ist hier durch die Einbeziehung aller Abstände noch genauer feststellbar: sie liegt bei 1,17 m. Von 1,5 m an steigt der Graph mit leichten Stufen und Zacken an, bis er bei 2,1 m die Untergrenze für die Unterscheidung von Zufallsphänomenen schneidet.

Der nicht kontinuierliche Anstieg belegt die Existenz mehrerer *Regelabstände*. Der erste liegt zwischen 1,51 m und 1,72 m. Hier nimmt die Zahl der Abstände rasant zu, wobei der steilste Anstieg bei 1,62 m zu beobachten ist. Der kleinste Regelabstand entspricht also etwa 1,62 m. Zwischen 1,72 m und 1,78 m folgt eine deutliche Stufe. Dann kommt wieder ein weiterer steiler Abschnitt zwischen 1,78 m und 1,91 m. Demnach liegt der nächste Regelabstand bei etwa 1,86 m. An diesen steilen Abschnitt schließt sich ein leicht nach unten weisender Zacken zwischen 1,91 m und 1,97 m an. Dahinter steigt der Graph wieder steil an und erreicht bei 2,10 m sowohl die Untergrenze für Zufallsprozesse als auch die Wendemarke zur nächsten Stufe.

Der dritte gut belegbare Regelabstand ist zwischen 1,97 m und 2,10 m zu suchen und dürfte dem steilsten Abschnitt bei 2,06 m entsprechen. Ab der Grenze $r = 2,1$ m kann man nicht mehr ausschließen, dass es sich um zufällige Schwankungen handelt. Hier hinein fällt aber ein letzter steiler Anstieg zwischen 2,29 m und 2,38 m. Die Beobachtung besitzt jedoch bei dieser Methode keine Signifikanz mehr (vgl. u. $g(r)$). Das gilt auch für die sich zwischen 3,6 m und 3,8 m andeutende Zusammendrängung, die dem Doppelten des Regelabstandes von 1,86 m entspräche.

Anhand des Graphen für $L(r)$ kann man die weiter oben bereits bei $G(r)$, $F(r)$ und der Hazardrate $\lambda(r)$ beobachteten Unterschiede bei den Regelabständen präzisieren. Nach der Schachtverteilung in der Kiesgrube zu schließen, gab es mindestens drei unterschiedliche Regelabstände: bei 1,62 m, 1,86 m und 2,06 m. Aufgrund des Zusammenhanges zwischen den zugrundeliegenden Daten ist die Übereinstimmung zwischen der bei $G(r)$ herausgestellten Marke von 1,78 m und der entsprechenden Stufe (1,72 m bis 1,78 m) von $L(r)$ nicht besonders überraschend. Bemerkenswerterweise fallen die Abstufungen in der Regelmäßigkeit genauso aus, wie oben bei $\lambda(r)$ vermutet. Dort wurde ein Wert von 0,24 m herausgestellt, wobei aber wegen der spezifischen Datenlage bei dieser Funktion seine wirkliche Größe etwas kleiner sein sollte. Hier stößt man nun auf Stufenabstände von 0,24 m und 0,20 m.

Über die Breite der steilen Graphenabschnitte kann man den Einfluss der oben erläuterten *Fehlerquellen* (s. o. 2.1.3.) bzw. die Ungenauigkeit bei der Ermittlung der Schachtmittelpunkte genauer bestimmen. Diese Breite erreicht einmal 0,21 m (1,51 m bis 1,72 m) und zweimal 0,13 m (1,78 m bis 1,91 m sowie 1,97 m bis 2,10 m). Nimmt man an, dass tatsächlich die Abstände (1,62 m, 1,86 m und 2,06 m) angestrebt waren, bei denen jeweils die größte Steigung auftritt, erhält man einen Eindruck von der Aussagenunschärfe, die von den oben erläuterten Fehlerquellen (s. o. 2.1.3.) verursacht wurde. Der Einfluss ist sehr gering! Er beläuft sich maximal auf etwa einen Dezimeter. Genauer betrachtet, ergeben sich folgende Schwankungen. Der kleinste Regelabstand ist am stärksten betroffen. Hier erreicht die Unschärfe ihre größten Werte (- 0,11 m und + 0,10 m). Bei den anderen beiden ähnelt sich die Art der Unschärfe. Die Abweichungen betragen hier -0,08 m und + 0,05 m bzw. -0,09 und + 0,04! Glücklicherweise fallen neolithische Fehler bei der Schachtplatzierung hier als Ursache aus, denn sie gehen ja bereits auf andere Art in den Verlauf des Graphen ein. Da der Einfluss der Fehlerquellen zudem entgegen den Erwartungen für sich aufsummierende Messfehler beim kleinsten Phänomen am größten ist, kommen weder neolithische noch moderne Messfehler in Frage.

Eigentlich verbleiben nur zwei Faktoren als *Fehlerursachen*. Beide gehen auf die verwendete Untersuchungsmethode zurück. Einmal ist vielleicht die Repräsentativität der Schachtmittelpunkte in mehreren Metern Tiefe (s. o. 2.1.) von leichter Ungenauigkeit betroffen.

Sodann birgt natürlich die Setzung der Schachtmittelpunkte von Hand gewisse Unschärfen. Die Setzung erfolgte ja nach Augenmaß mittels der Kreise durch die regelmäßigen Partien der Schachtumrisse (s. o. 2.1.3.). Ein nicht ganz optimal an den Schacht angepasster Kreis wirkt sich bei kleineren Entfernungen besonders stark aus. Hier liegt also wahrscheinlich die größte Fehlerquelle für die Genauigkeit der Untersuchung. Da dieses Vorgehen jedoch am praktikabelsten ist und ohne weitere komplizierte Programmierungsschritte erfolgen kann, muss man auch seine Nachteile akzeptieren. An den Beobachtungen werden zwei Aspekte deutlich: Sowohl die neolithischen Bergleute (Schachtplazierung) als auch die modernen Archäologen (Grabungsdokumentation) gingen bei ihren Tätigkeiten mit großer Sorgfalt und Präzision vor. Erst mit den manuellen Arbeitsschritten bei der GIS-Auswertung schlich sich ein kleinerer Fehler ein. Dabei ist aber das Entscheidende, *die von der Methode verursachten Unschärfen sind so gering, dass man mit einer akzeptablen Ungenauigkeit die von den Neolithikern verwendeten Abstände bzw. Längen identifizieren kann.*

In der *Halde* bietet sich prinzipiell das gleiche Bild wie in der Kiesgrube. Auch hier unterschreitet der empirische Graph vom Beginn des interpretierbaren Verlaufs an die bei Zufall zulässige Untergrenze und durchstößt sie erst bei $r = 2,08$ m. Wieder liegt eine Inhibition bzw. eine Verteilung mit regelhaften Abständen vor. Die auffällige Ähnlichkeit zwischen diesem r -Wert und dem für die Kiesgrube (2,10 m) geht vermutlich darauf zurück, dass in beiden Arealen (zunächst) die gleichen Planungsprinzipien angewendet wurden. Zusätzlich besitzt der Graph der Halde aber noch einen weiteren Abschnitt (zwischen 3,02 m und 3,17 m), bei dem sich eine signifikante Inhibition zeigt.

Um dies zu verstehen, ist ein genauerer Blick auf den Graphenverlauf nötig. Wiederum liegt ein erster Sägezahn bei 0,47 m an fast der gleichen Stelle wie in der Kiesgrube; er geht gleichermaßen auf sich überschneidende Schächte zurück. Dahinter fällt der Graph weiter ab. Das erfolgt aber mit wesentlich mehr kleinen Stufen und Zacken als in der Kiesgrube. Dies geht, wie an den Schachtplänen leicht zu erkennen (vgl. z. B. 2.1.1., Abb. 2.3), auf wesentlich mehr zu dicht beieinander liegende Schächte zurück. Der Vergleich mit dem Graphen der Kiesgrube liefert so ein objektives Maß dafür, wie stark spätere Eingriffe und Störungen die Schachtverteilung in der Halde störten. Während auf dem weitgehend ungestörten Areal der Kiesgrube nur bei 0,7 m bis 0,8 m eine nennenswerte Stufe auftritt, ist in der Kiesgrube mit dem Abschnitt zwischen 0,66 m und 0,9 m ein viel größerer Bereich von Stufen und Zacken betroffen. Hier gab es also wesentlich mehr Plazierungsfehler! Dies wirkt sich auch noch auf die Sohle des Graphen zwischen etwa 1,0 m und 1,32 m aus, die ja eigentlich mit einem waagrechten Verlauf den Bereich der weitestgehend gemiedenen Abstände anzeigen sollte.

Dass aber auch dieser Abschnitt weiterhin einen ähnlich unruhigen Verlauf besitzt, ist als Hinweis auf eine Überprägung durch weitere Plazierungsfehler zu verstehen. Das absolute Minimum liegt bei 1,2 m und damit bei einem Dezimeter weniger als in der Kiesgrube. $L(r)$ fällt mit etwa -0,74 auch etwas schwächer aus als dort. Insgesamt wird die Sohle (1,0 m bis 1,32 m) bei deutlich kleineren Abständen erreicht, als in der Kiesgrube (1,07 m bis 1,51 m).

Die Differenz zwischen den Wendepunkten, bei denen der Graph wieder zu steigen beginnt, ist ein gutes Indiz dafür, um wieviel näher man in der Halde die Schächte aneinander heranrückte. In der Halde fällt diese Marke um 0,19 m (1,51 m – 1,32 m) kleiner aus als in der Kiesgrube. Wie erwartet ist sie damit etwas größer, als das oben aus der Kombination von Lückengrößen und den Nächsten-Nachbarn-Abständen abgeleitete Zugeständnis bei den Regelabständen (0,14 m bzw. 0,18 m).

Der Sohle folgt zwischen 1,32 m und 1,39 m ein erster steiler Anstieg mit der höchsten Steigung bei 1,36 m. Danach schließt sich bis 1,61 m ein von kleinen Stufen und Zacken geprägter Kurvenverlauf an. Erst zwischen 1,61 m und 1,73 m folgt ein neuerlicher Abschnitt mit einem deutlichen Anstieg. Seine steilste Stelle liegt bei 1,64 m. Hier tritt also ein ganz ähnlicher Regelabstand wie in der Kiesgrube (1,62 m) auf. Nach oben beträgt die Schwankungsbreite dieses Abschnittes noch 0,09 m und ähnelt damit dem gleichen Wert in der Kiesgrube (1,72 m – 1,62 m = 0,10 m). Nach unten allerdings wirkt dieser Abschnitt durch die geringe Schwankungsbreite von 0,01 m (1,62 m – 1,61 m) gegenüber dem aus der Kiesgrube gekappt. Dort betrug dieser Wert 0,11 m. Wenn man den unregelmäßigen Graphenverlauf zwischen 1,39 m und 1,61 m bedenkt, wird klar, dass sich mit dieser Kappung die Überlagerung des ursprünglichen Nutzungsmusters durch die späteren Eingriffe bemerkbar macht.

Die auf den Steilanstieg bis 1,73 m folgende Stufe erstreckt sich bis 1,8 m. Sie liegt damit beinahe genau an der gleichen Stelle wie in der Kiesgrube (1,72 m bis 1,78 m). Auch der nächste, um einen Regelabstand schwankende Bereich (1,8 m bis 1,91 m) entspricht weitgehend seinem Pendant in der Kiesgrube (1,78 m bis 1,91 m). Der Vergleichswert in der Kiesgrube betrug 1,86 m. In der Halde fallen hier zwei besonders steile Abschnitte auf, die bei 1,84 m bzw. 1,86 m liegen. Die entsprechenden Unschärfen (Untergrenze 1,8 m, Obergrenze 1,91 m) betragen demnach 0,04 m und 0,07 m bzw. 0,06 m und 0,05 m.

Ein deutlicherer Unterschied zur Kiesgrube zeigt sich erst beim nächsten Abschnitt des Graphen. Zwischen 1,91 m und 2,06 m steigt er nur wenig an und weist mehrere kleine Stufen und Zacken auf. Auch hier erscheint es, als ob von einem eigentlich größeren Steilabschnitt nur der Teil zwischen 2,06 m und 2,1 m (größte Steigung bei 2,08 m) erhalten ist, und der Rest nachträglich von Störungen überlagert wurde.

In jedem Fall ähnelt der hier auftretende Regelabstand von 2,08 m wieder dem entsprechenden Wert in der Kiesgrube (2,06 m).

Verbindet man die Resultate zu den Regelabständen (Kiesgrube: 1,62 m, 1,86 m und 2,06 m; Halde: 1,64 m, 1,84 m bzw. 1,86 m und 2,08 m), so erhält man ein klares Bild. *Auf beiden Flächen wurde grundsätzlich mit dem gleichen Repertoire von Distanzgrößen geplant: die Neolithiker verwendeten Regelabstände von 1,63 m, 1,85 m und 2,07 m, die aus einem System mit gleich großen Abstufungen von ca. 0,22 m entnommen waren.*

Während in der Kiesgrube kein signifikanter Graphenabschnitt mehr folgt, fällt in der Halde das signifikante Fehlen von Abständen zwischen 3,02 m bis 3,17 m auf. Sie sind wesentlich seltener vorhanden, als es bei Zufall zu erwarten wäre. Halbiert man die zu selten auftretenden Abstände (1,51 m bis 1,59 m), fällt auf, dass sie gerade etwas geringer ausfallen, als das Doppelte des kleinsten Regelabstandes ($1,62 \text{ m} * 2 = 3,24 \text{ m}$). Damit erfasst $L(r)$ einen Bezug zwischen drei in beliebiger Richtung "hintereinander liegender" Schächten, der auf den gleichen Abstand zurückgeht! Und beim Wert 3,2 m (Lückendurchmesser bei $r = 1,6 \text{ m}$) hatte ja schon die Funktion $F(r)$ ihre Obergrenze erreicht und dadurch einen bestimmten Aspekt der Regelmäßigkeit des Haldenareals bezeichnet.

Wie bereits bei $F(r)$ liegt die Erklärung höchstwahrscheinlich in der späteren Störung eines bereits bestehenden Musters. Bedingt durch das "Hineinquetschen" von Schächten in die vorhandene Verteilung, bei denen jeweils der kleinste Regelabstand (1,62 m) zur Anwendung kam (vgl. auch den extremen Gipfel von $\lambda(r)$ bei 1,72 m), war die Schachtverteilung in der Halde so extrem von diesen Abständen geprägt, dass sich dies auch noch beim Doppelten der entsprechenden Werte signifikant bemerkbar machte. In der Kiesgrube war das ursprüngliche, von mehreren unterschiedlich großen Regelabständen geprägte, Muster nicht in derselben Weise verändert worden. Die Abstände zwischen drei in x-beliebiger Richtung (isotrop) "hintereinander liegenden" Schächten wiesen dort Abstände auf, die einmal dem einen, einmal dem anderen Regelabstand gehorchten. Manchmal waren sie vielleicht auch gar nicht genau beim neolithischen Vermessen berücksichtigt worden. Das in der Halde beobachtete Phänomen ist ein deutlicher Hinweis auf Isotropie (Richtungsunabhängigkeit) der Schachtanordnungsstruktur: Das beobachtete Phänomen ist in alle Richtungen gleich ausgeprägt. Der eigentlich wichtige Befund ist jedoch, dass die Schachtverteilung in der Halde neben den Regelabständen extrem von der Einhaltung bestimmter Mindestabstände geprägt ist.

Es sei ausdrücklich betont, dass sich aus der für den Abstand von 1,62 m zu beobachtenden Isotropie kein Widerspruch in der Argumentation ergibt, auch wenn im Weiteren für die Kiesgrube die Gruppierung von Schächten erwogen wird (s. u. 2.1.5.ff.).

Ein *isotropes Phänomen ist kein Argument gegen die Existenz von Schachtgruppen*, deren einzelne Schächte jeweils in einer Reihe liegen (s. u. 2.1.5.ff.), während bei den Gruppen nur ungefähr Regelabstände zwischen ihren Achsen beachtet wurden. Eine solche Ausgangssituation würde sich nur bei einer anisotropen (!) Betrachtung bemerkbar machen, wenn man also quasi nur die Abstände betrachten würde, deren Achsen ungefähr gleich ausgerichtet sind. Erst dann könnten sich überhaupt “Verdoppelungseffekte“ einstellen, wie sie beim $L(r)$ der Halde vorliegen.

Die letzte der untersuchten Funktionen, die *Paarkorrelationsfunktion* $g(r)$ (STOYAN/STOYAN 1992, 274ff.) oder englisch ‘pair correlation function‘ (BADDELEY/TURNER 2006, 242ff: ‘pcf’), baut auf der Dichte des Punktfeldes auf.

Die folgende Darstellung richtet sich nach Stoyan und Stoyan (a. a. O.). Ausgangspunkt bildet folgende Wahrscheinlichkeitsfunktion: Wenn um die Mittelpunkte x_1 und x_2 jeweils extrem kleine Kreise mit den Flächen F_1 bzw. F_2 gezeichnet werden, die sich nicht überschneiden, ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass in beiden Kreisen jeweils ein Punkt des Punktfeldes liegt gleich:

$$\rho^2(x_1, x_2) F_1 F_2.$$

Bei einem homogenen und isotropen Punktfeld ist dieser Wert nur noch vom Abstand r der Punkte x_1 und x_2 abhängig. Diese Art der Berechnung wirkt sich gegenüber leichten empirischen Schwankungen als schwache Überglättung aus. Nach weiteren Umformungen erhält man eine Formel, die im Prinzip das gleiche aussagt und für einen Poissonprozess folgendermaßen lautet:

$$g(r) = K'(r) / 2 \pi r.$$

Dabei ist $K'(r)$ die Steigung von $K(r)$ bzw. ihre erste Ableitung. Nach einem Blick auf die entsprechende Formel $K(r)$ bei einem Poissonprozess wird klar (vgl. o.), dass theoretisch für $g(r)$ stets der Wert 1 zu erwarten ist.

Mit der *Interpretation* von $g(r)$ gewinnt man einen weitreichenden Einblick in die Beziehung zwischen den Punkten eines Feldes. Vereinfachend könnte man sagen, der Graph gibt an, inwieweit das Auftreten eines Punktes durch die Existenz anderer Punkte in der Entfernung r bedingt wird. Ist dies nicht der Fall, verläuft er innerhalb der Schwankungsgrenzen eines Zufallsprozesses. Der Graph $g(r)$ zeigt dann interpretierbare Ausschläge, wenn vom Zufall abweichende Ordnungsmuster vorhanden sind. Wie bei der bisherigen Auswertung kann man diesen Fall daran erkennen, dass der Graph die Schwankungsgrenzen über- oder unterschreitet, die bei Zufallsverteilungen zulässig sind. Hohe Werte von $g(r)$ belegen das häufige Auftreten von Punktpaaren mit dem Abstand r , kleine Werte weisen dementsprechend auf die Seltenheit des entsprechenden Abstandes r hin.

Je schärfer sich ein Maximalwert vom restlichen Graphen absetzt, desto einheitlicher ist der Abstand zwischen den beteiligten Punkten. Das erste Maximum hängt vom Abstand eines Punktes zu seinen unmittelbaren Nachbarn, das zweite vom Abstand zu den ersten indirekten Nachbarn ab. Typischerweise ist der Wert $r_{2,max}$, bei dem das zweite Maximum auftritt, kleiner als das Doppelte des Wertes $r_{1,max}$, bei dem das erste Maximum liegt ($r_{2,max} < 2 * r_{1,max}$). In seltenen Fällen können solche Beziehungen noch weitere Maxima aufweisen. Aber auch die Minima besitzen Aussagekraft. So resultiert das erste Minimum aus dem weitgehenden Fehlen von weiteren Punkten unmittelbar "hinter" den direkten Nachbarn usw.

Die Funktion $g(r)$ erlaubt die einfache Berechnung zweier *Kennwerte* für die Ordnung eines Punktfeldes. Der erste Kennwert charakterisiert den Grad der *Nahordnung*, also die Stärke der Ordnungsbeziehung zwischen unmittelbaren Nachbarn. Er wird von Stoyan und Stoyan als M bezeichnet. Die Formel für seine Berechnung lautet:

$$M = (g(r_1) - g(r_2)) / (r_2 - r_1).$$

Dabei ist r_1 der Wert, bei dem das erste Maximum des Graphen $g(r)$ auftritt und r_2 der Wert, bei dem das erste Minimum auftritt. Bei einer Zufallsverteilung ist $M = 0$, d.h. das Punktfeld weist keine Nahordnung auf.

Der zweite Kennwert liefert einen Hinweis auf die *Reichweite* der Regelmäßigkeit. Ab einer bestimmten Entfernung besteht zwischen dem Auftreten eines Punktes und dem eines anderen kein Zusammenhang mehr. Den Wert, ab dem diese Situation eintritt, bezeichnet man als *Korrelationsreichweite*, hier mit *KW* abgekürzt. Bei seiner Bestimmung hilft die Einbeziehung der Schwankungsgrenzen, die für Zufallsverteilungen zulässig sind. Hier wurde als *KW* jeweils der Wert gewählt, bei dem der empirische Graph zum letzten Mal eine Schwankungsgrenze schneidet. Die r -Werte, bis zu denen $g(r)$ maximal berechnet werden kann, sind etwas kleiner als die Hälfte des kleineren Längenmaßes der jeweiligen Untersuchungsfläche.

Es gibt allerdings auch eine *kritische Anmerkung* zum Ergebnis der bisherigen und der folgenden Auswertung (STOYAN/STOYAN 1992, 279ff.). Die Paarkorrelationsfunktion von zufällig verteilten Punkten, die eigentlich Zentren kreisförmiger Objekte mit einem bestimmten Durchmesser sind, kann einen scheinbar sehr hohen Ordnungsgrad widerspiegeln, obwohl die Ordnung Ergebnis des Zufalls ist. Dieser Fall tritt ein, wenn sich die Flächen der Objekte nicht überschneiden und sie dabei gleichzeitig einen Großteil der Untersuchungsfläche abdecken. Solche Verteilungen werden auch "zufällige Packungen" genannt. Der Graph weist dann mehrere Maxima jeweils beim Vielfachen des Kreisdurchmessers auf (STOYAN/STOYAN 1992, 281 Bild III.20).

Allerdings besitzt die Amplitude der Ausschläge bei zufälligen Packungen einen typischen Verlauf: Die Spitzenwerte verringern sich zunächst stark und später immer schwächer. Im Vorgriff auf die empirischen Graphen kann bereits festgestellt werden, dass dieses Phänomen hier nicht vorliegt.

Aus archäologischer Sicht ist noch anzumerken, dass es gute Gründe gegen das Vorhandensein einer dichten Packung gibt. Nur wenn man Schächte immer so angelegt hätte, dass ihre Wände einander berühren, hätte sich dieser Effekt einstellen können. Auch die oben bereits mehrfach und auch im Weiteren (s. u. 2.1.4.3.) noch belegbare Existenz mehrerer verschiedener Regelabstände steht einem einheitlichen Zufallsphänomen dieser Art entgegen.

Bei der Betrachtung des Graphen der *Kiesgrube* lassen sich viele Anhaltspunkte für die bisherigen Ergebnisse und Interpretationen wiederfinden (**Abb. 2.22**).

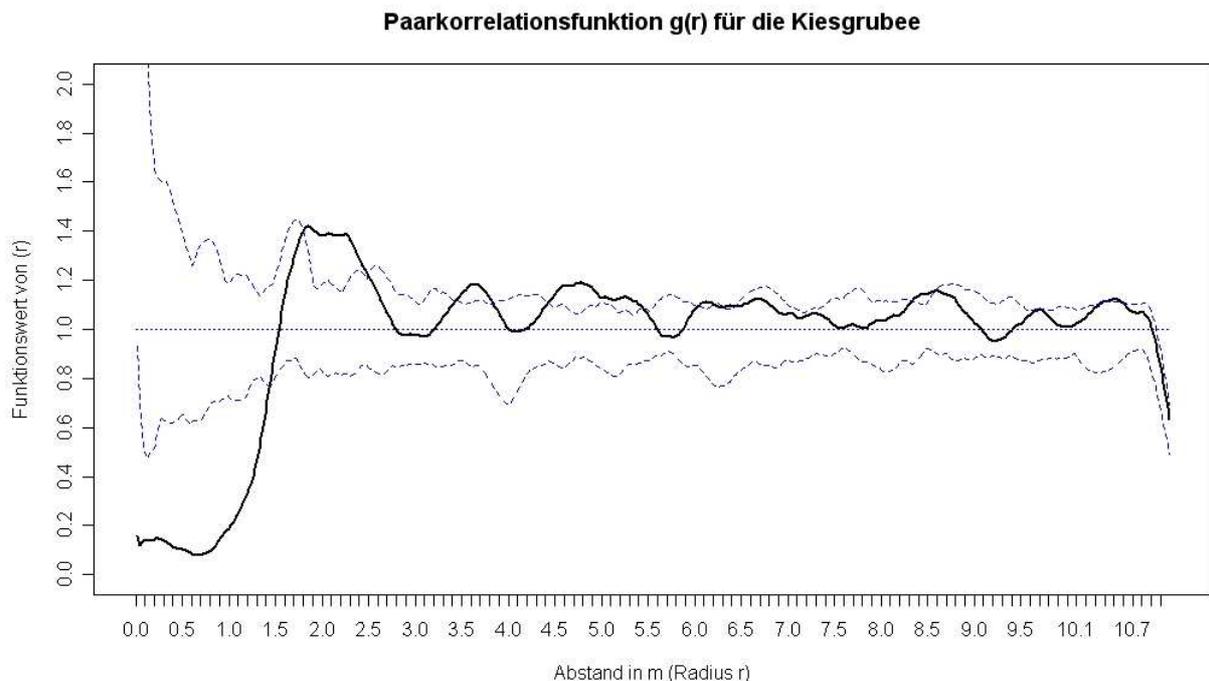


Abb. 2.22: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik. Punktpaarkorrelationsfunktion $g(r)$ für die Kiesgrube (Interpretation siehe Text). Die schwarze Linie bezeichnet die empirische Graphenkurve. Die gepunktete blaue Linie steht für den Graphenverlauf eines Zufallsprozesses und zwischen den gestrichelten blauen Linien befindet sich der Kanal möglicher Schwankungen des Zufalls.

Bis zu einem Abstand von 1,42 m zwischen den Schachtmittelpunkten – was etwa 0,2 m bis 0,4 m zwischen den Wänden der jeweilige Schächte entspricht – verläuft der Graph unterhalb des Kanals für Zufallsverteilungen. Die Kurve liegt dabei zunächst nicht waagrecht bei Null, sondern zeigt einen kleinen Ausschlag nach oben. Ab einem Wert von ca. 0,8 m steigt der Graph dann erst langsam und schließlich immer steiler an.

Bei 1,42 m schneidet er, von unten kommend die Schwankungsgrenzen. Dass die Kurve am Anfang nicht waagrecht bei Null verläuft, ist Ergebnis von Plazierungsfehlern bei der Schachtneuanlage und die entsprechenden Abstände wurden oben bereits diskutiert.

In der Kiesgrube konnten sechs, wegen Überschneidung gut erkennbare, Fälle herausgestellt werden (vgl. o. 2.1.4.1. Abb. 2.15 unten: orange markierte Schächte). Aber auch andere, nach den bisherigen Ergebnissen "zu nahe" beieinander liegende Schächte gehören zu diesen Plazierungsfehlern. Der Graph steigt weiter und verlässt den Zufallskanal bei 1,80 m. Dahinter schließt sich ein breiter, etwas diffuser Gipfelkomplex an, der drei leicht abgesetzte Maximalwerte aufweist. Der Größte liegt bei 1,85 m, zwei weniger deutliche bei 2,08 m und 2,26 m. Bei 2,52 m taucht die Kurve wieder in den Bereich des Zufalls ein. Der Gipfel zeigt den Bereich der häufigsten kurzen Punktabstände an. Er besteht nicht aus einer einzigen scharfen Spitze, sondern besitzt im Abschnitt zwischen 1,80 m und 2,52 m mehrere kleine Gipfel. Seine Mitte liegt etwa bei 2,16 m. Dass das breite und diffuse erste Maximum eher einen wenig einheitlichen Abstand zwischen den unmittelbaren Nachbarn anzeigt, war nach dem oben vorgestellten Auftreten mehrerer Regelabstände zu erwarten. Die Ergebnisse bestätigen sich hier gegenseitig: Zwar tritt der oben bei $L(r)$ beobachtete Regelabstand von 1,63 m nicht wieder auf, aber die anderen beiden möglichen Regelabstände 1,85 m und 2,07 m sind vorhanden.

Auch dieser Befund legt nahe, dass nicht ein Regelabstand ungenau eingehalten wurde, sondern mehrere, einander ähnliche Regelabstände jeweils häufig auftraten. Verbindet man dies noch mit der oben festgestellten Ungenauigkeit der zugrundeliegenden Daten von etwa einem Dezimeter, wird klar, warum das erste Maximum aussieht, also ob nur ein einziger, wenig einheitlicher Regelabstand vorhanden sei. *Das gemeinsame Auftreten mehrerer Regelabstände führt dazu, dass das leicht überglättende $g(r)$ scheinbar (!) einen, wenig einheitlichen Regelabstand zwischen den unmittelbaren Nachbarn anzeigt.* Und wie bereits bei $\lambda(r)$ und $L(r)$ zu erkennen, ist auch hier wieder eine Stufe mit ähnlicher Größe (0,22 m) vorhanden.

Die Auswertung von $G(r)$, $\lambda(r)$ und $L(r)$ zeigte bereits, dass das Punktfeld Kiesgrube deutliche Regelabstände besitzt. Wenn man nun anhand des folgenden Kurventals die Stärke der *Nahordnung* M berechnet, ist zu bedenken, dass dieser Wert stark von den gemeinsam auftretenden, unterschiedlichen Regelabständen beeinflusst sein wird. Deshalb sollte sich trotz aller bisherigen Aussagen zur hohen Regelmäßigkeit der Verteilung ein eher enttäuschender Wert ergeben. Das Minimum nach dem ersten Gipfel erreicht der Graph mit $g(r_2) = 0,97$ bei einem r_2 von 2,89 m. Das erste Maximum mit $g(r_1) = 1,43$ lag bei einem r_1 von 1,85 m. Setzt man die entsprechenden Zahlen in die Formel für M ein, ergibt sich ein Wert von 0,44. Nach diesem Kennwert zu urteilen ist eine Nahordnung zwar vorhanden, sie scheint (!) aber nicht besonders hoch zu sein.

Das zweite Maximum zwischen 3,42 m und 3,81 m ist deutlich ausgeprägt und besitzt nur eine markante Spitze. Es tritt untypischerweise genau beim Doppelten des ersten Maximums ($2 * 1,85 \text{ m} = 3,70 \text{ m}$) auf, ja es weist sogar ein kleines Plateau zwischen 3,60 m und 3,70 m auf. Danach sinkt der Graph zunächst wieder auf den Erwartungswert einer Zufallsverteilung ab. Anhand dieses zweiten Maximums kann man nun zum ersten Mal mit einer punktfeldstatistischen Methode beweisen, dass die Regelmäßigkeit – jeweils von einem Schacht aus gesehen – sich auf einen weiteren Umkreis bezieht, als nur das jeweilige direkte Umfeld eines Schachtes.

An dieser Stelle wird aus Anschaulichkeitsgründen die Bezeichnung “mittelbarer Nachbar der x-ten Ordnung“ eingeführt. Die Beziehung zwischen einem Punkt und seinen unmittelbaren Nachbarn erster Ordnung ist, wie beschrieben, für das erste Maximum verantwortlich. Bei regelhaften Abständen, die zwischen dem Punkt und seinen mittelbaren Nachbarn zweiter Ordnung auftreten, entsteht ein zweites Maximum.

Dass die mittelbaren Nachbarn zweiter Ordnung genauso weit entfernt sind, wie es dem Doppelten des Wertes 1,85 m entspricht, verweist darauf, dass es sich hier um den wichtigsten Regelabstand handelt. Das dritte signifikante Maximum zwischen 4,42 m und 5,46 m besitzt wiederum zwei Gipfel, einen bei 4,79 m und einen bei 5,24 m. Die breite dieses Maximums und seine nur diffus ausgeprägten Gipfel lassen vermuten, die Bezüge zu den mittelbaren Nachbarn dritter Ordnung seien weniger einheitlich ausgeprägt. Das ist ein indirektes Indiz für die weiter unten angenommene häufige Gruppierung von drei Schächten in einer Linie.

Um den Bereich dieses signifikanten Maximums finden sich jedoch gleich mehrere verschiedene Vielfache der oben beschriebenen Regelabstände wieder ($2 * 2,26 \text{ m} = 4,52 \text{ m}$; $3 * 1,64 \text{ m} = 4,92 \text{ m}$ und $3 * 1,85 \text{ m} = 5,55 \text{ m}$). Die Form dieses Ausschlages wird also – wie das erste Maximum – von der Überlagerung mehrerer Punktbeziehungen mitgeprägt, wobei sich jeweils andere Regelabstände bemerkbar machen.

Nach einem kurzen Absinken auf Zufallsniveau beginnt bei 6,03 m das vierte Maximum. Der Ausschlag dieses Maximums ist in zwei Abschnitten signifikant: von 6,03 m bis 6,21 m und von 6,30 m bis 6,43 m. Die entsprechenden Gipfel liegen bei 6,11 m und 6,35 m. Diese beiden Abschnitte werden hier zusammen als ein Maximum gezählt. Zu seiner Bewertung wird auch der folgende Kurvenverlauf herangezogen, der nicht signifikante Erhebungen bei 6,67 m, 6,98 m und bei 7,30 m aufweist. Insgesamt liegen vier Vielfache verschiedener Regelabstände ($3 * 2,08 \text{ m} = 6,24 \text{ m}$; $4 * 1,64 \text{ m} = 6,56 \text{ m}$; $3 * 2,26 \text{ m} = 6,78 \text{ m}$ und $4 * 1,85 \text{ m} = 7,40 \text{ m}$) vor, die die Beziehung zwischen den Schachtmittelpunkten geprägt und damit den Kurvenverlauf verursacht haben können.

Bedenkt man nun, dass einerseits mit einer Ungenauigkeit von einem Dezimeter zu rechnen ist (s. o.), die sich im Einzelfall auch aufsummieren könnte, und andererseits die regelhaften Punktbeziehungen der vierten mittelbaren Nachbarn auf eine Kombination aus mehreren unterschiedlichen Regelabständen zurückgehen könnten, ist es erstaunlich, überhaupt noch signifikante Ausschläge vorzufinden. Die nicht mehr signifikanten Erhebungen bei 6,67 m und 7,30 m weisen trotzdem noch Bezüge zu den Vielfachen einheitlicher Abstände auf ($3 * 2,26 \text{ m} = 6,78 \text{ m}$ und $4 * 1,85 \text{ m} = 7,40 \text{ m}$). Ab 8,32 m folgt der mittlerweile fünfte signifikante Ausschlag. Er gehört zu einer Erhebung des Graphen, die bis etwa 8,80 m reicht, aber nur bis zu $r = 8,58 \text{ m}$ signifikant ist. Der signifikante Gipfel liegt bei 8,46 m. Mittlerweile ist es wenig verwunderlich, dass auch hier ein Bezug zum Vielfachen eines Regelabstandes hergestellt werden kann ($4 * 2,08 \text{ m} = 8,32 \text{ m}$).

Während die Höhe des Ausschlages der Maxima zwei bis vier (und der ersten nicht signifikanten Erhebung nach Maximum Vier), jeweils ungefähr gleich hohe Ausschläge bei $g(r)$ aufweisen, ist beim fünften Maximum wieder ein größerer Funktionswert zu finden. Diese Beobachtung ist ein entscheidendes Argument gegen den Einwand, es könne sich um eine sog. zufällige Packung handeln (vgl. o.). Bei zufälligen Packungen dürfte nämlich so ein Ausschlag nicht auftreten. Zudem lassen sich die Maxima auf Vielfache von verschiedenen (!) Werten zurückführen.

Um 9,7 m herum ist das sechste signifikante Maximum zu finden. Der darauf beziehbare Regelabstand ist 1,64 m ($6 * 1,64 \text{ m} = 9,84 \text{ m}$).

Das letzte, und mittlerweile siebte signifikante Maximum ist wieder ein schwächer ausgeprägter Gipfel zwischen 10,31 m und 10,60 m mit einem Maximum bei 10,52 m ($5 * 2,08 \text{ m} = 10,40 \text{ m}$). Die *Reichweite* der Regelhaftigkeit bei der Schachtverteilung kann demnach auf 10,6 m veranschlagt werden. Als Marke für die Korrelationsreichweite KW wird, wie gesagt, der Schnittpunkt des Graphen mit der Schwankungsgrenze nach dem letzten signifikanten Ausschlag herangezogen. Eine Korrelationsreichweite von 10,6 m bedeutet, die Lage eines Schachtes in der Mitte der Kiesgrube weist Ordnungsbezüge auf, die bis zu den Grenzen der Untersuchungsfläche reichen! Zu bedenken ist, dass die Methode am Rand eine Grenzeffektkorrektur vornimmt und die Ordnungsreichweite deshalb etwas kleiner als die halbe Kiesgrubenbreite ausfallen muss.

Der nach der Triangulation geäußerte Eindruck einer extrem *regelmäßigen Verteilung* wird von der Methode auf dem Niveau fünfundneunzigprozentiger Sicherheit bestätigt. Dieser Befund erlaubt aber noch weitere wichtige Aussagen. Die Regelhaftigkeit in der Kiesgrube erstreckt sich über die gesamte Untersuchungsfläche. Dabei ist sie so gut wie ungestört erhalten. Mit der Schachtverteilung der Kiesgrube hat man also die beinahe unveränderten Hinterlassenschaften der neolithischen Abbauorganisation vor sich!

Gegenüber dem komplizierten und informationsreichen Verlauf des Graphen für die Kiesgrube ist der für die *Halde* relativ einfach strukturiert (**Abb. 2.23**). In seinem ersten Abschnitt zeigt der Graph eine deutliche Inhibition, die signifikant für alle Abstände kleiner 1,41 m ist. Zunächst kurz bei Null verweilend, steigt die Kurve erst langsam an, um ab der Marke 1,04 m in einen steilen, kontinuierlich steigenden Verlauf überzugehen. Die zahlreichen Fehlplazierungen machen sich vor allem im Abschnitt bis 1,04 m bemerkbar.

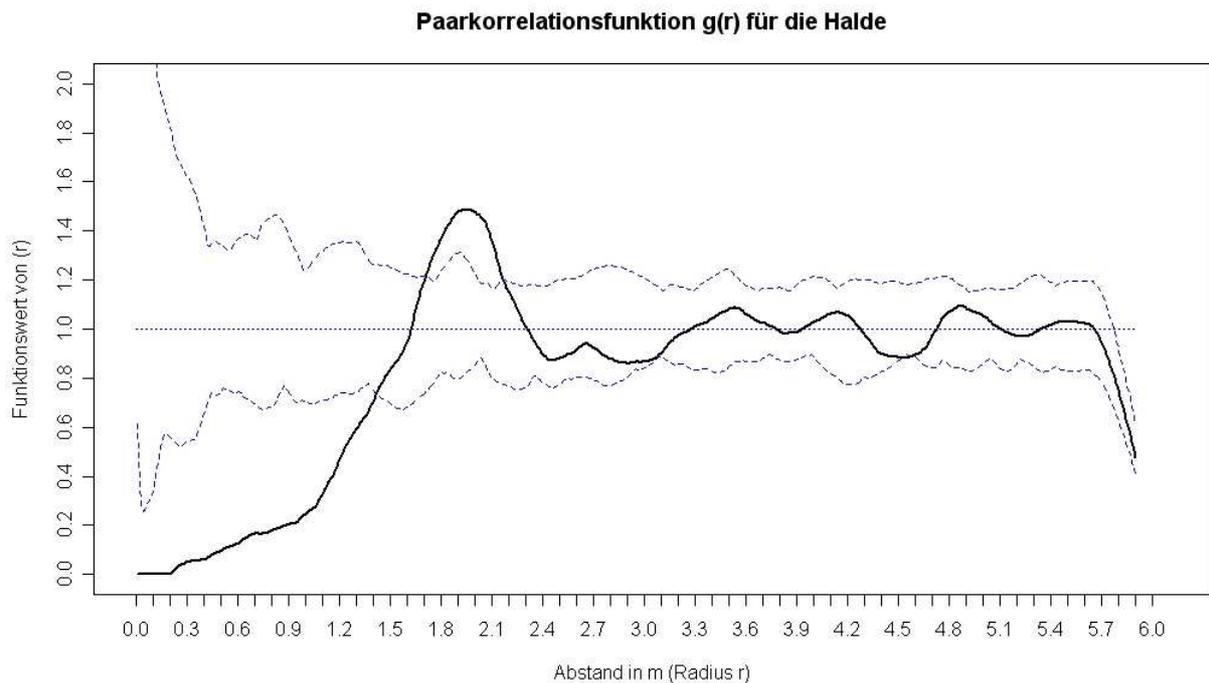


Abb. 2.23: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik. Punktpaarkorrelationsfunktion $g(r)$ für die Halde (Interpretation siehe Text). Die schwarze Linie bezeichnet die empirische Graphenkurve. Die gepunktete blaue Linie steht für den Graphenverlauf eines Zufallsprozesses und zwischen den gestrichelten blauen Linien befindet sich der Kanal möglicher Schwankungen des Zufalls.

Der Graph verläuft weiter steil nach oben und überschreitet bei 1,70 m die obere Schwankungsgrenze. Bis zu $r = 2,19$ m erstreckt sich das einzige signifikante Maximum. Sein Gipfel liegt mit $g(r_1) = 1,49$ bei einem r von 1,94 m. Er fällt markanter aus, als das erste Maximum in der Kiesgrube.

In Zusammenhang mit der Annahme, die Schachtverteilung in der Halde sei Ergebnis eines zuvor regelmäßigen Musters, das von einer Störung betroffen sei, ist ein mathematischer Effekt erwähnenswert (STOYAN/STOYAN 1992, 274ff.). Bei zufällig gestörten quadratischen Gittern weist die Funktion Maxima bei bestimmten r_i , der Wurzel von $2 r_i$, $2 r_i$ und so weiter auf.

Wenn der auch in der Halde gut belegte Regelabstand von 1,86 m einem solchen r_i entspricht, so sollte sich bei den vorhandenen Aussageunschärfen von etwa 1 Dezimeter, eine Situation ergeben, bei der alle beteiligten Werte zu einem markanten und scharf ausgeprägten Maximum um 1,9 m herum beitragen würden ($2 * 1,86 \text{ m} = 3,72 \text{ m}$; $(3,72 \text{ m})^{1/2} = 1,93 \text{ m}$; vgl. zu diesem Aspekt auch STOYAN/STOYAN 1992, 279 Bild III.17 mit dem Plan des Punktfeldes Halde s. o. Abb. 2.16). Das Maximum bei 1,94 m ist ein weiteres Argument dafür, dass die Schachtverteilung der Halde auf zufällige Störungen einer regelmäßigen Anordnung zurückgeht.

In Bezug auf die *Nahordnung* der Halde bestehen schon Erwartungswerte. Verschiedene Funktionen hatten gezeigt, dass diese Verteilung vor allem von extremen Naheffekten geprägt ist. So erwies sich bei $F(r)$, dass 100 % aller Lücken kleinere Radien als 1,6 m aufweisen. $J(r)$ hatte bei 1,72 m extrem starke Regelmäßigkeit angezeigt und $\lambda(r)$ hatte entsprechend bei 1,78 m mit einem extremen Ausschlag reagiert. Demnach sollte die Nahordnung M einen höheren Wert als in der Kiesgrube einnehmen. Das Minimum nach dem einzigen Gipfel ergibt bei $r_2 = 2,89 \text{ m}$ einen Funktionswert $g(r_2)$ von 0,97. Zusammen mit dem Wert beim ersten Maximum ($g(r_1) = 1,49$ und $r_1 = 1,94$; s. o.) errechnet sich für M der Wert 1,15. Die Nahordnung ist stark ausgeprägt. Sie fällt zweieinhalbmal höher aus, als die der Kiesgrube (0,44). Die Lage der unmittelbar benachbarten Schächte wurde also viel penibler beachtet, als in der Kiesgrube! Das lässt sich gut mit der Aussage verbinden, in der Halde seien später in ein bereits vorhandenes Muster noch weitere Schächte "hineingequetscht" worden. In diesem Fall hätte man aus Sicherheitsgründen die Lage aller umgebenden Schächte extrem genau berücksichtigen müssen.

Bemerkenswerterweise tritt in der Halde nun kein weiteres signifikantes Maximum mehr auf. Verfolgt man den Gedanken mit den späteren "Störern" findet sich auch hierfür eine Erklärung. Wenn einzelne später angelegte Schächte und die bei diesen Aktivitäten auftretenden Fehlplatzierungen hinzukamen, dürfte es kaum regelhafte Abstände zu den mittelbaren Nachbarn zweiter Ordnung geben. Da die späteren "Störer" ebenfalls in alle Beziehungen zwischen einem Schacht und seinen mittelbaren Nachbarn zweiter Ordnung eingehen, entsteht ein Bild der Regellosigkeit. Es überlagern sich hier ursprüngliche Regelabstände, die Sicherheitsabstände der "Störer" und vor allem die Abstände der fehlplazierten "Störer". Markante Gipfel können gar nicht mehr entstehen!

Allerdings sind in der Halde zwei Anzeichen von Regelmäßigkeit vorhanden, die in der Kiesgrube gar nicht vorkommen. Es treten gleich zweimal signifikante Täler auf, was auf extrem wenige Schächte mit diesen Abständen als mittelbare Nachbarn zweiter bzw. dritter Ordnung hinweist.

Das erste Tal liegt bei etwa 3,05 m. Das zweite erstreckt sich von 4,51 m bis 4,60 m. Bereits die Funktion $L(r)$ hatte für Abstände zwischen 3,02 m und 3,17 m einen Bereich signifikanter Inhibition ausgewiesen. Beide hier von $g(r)$ angezeigten Abstände kann man mit dem Abstand 1,52 m verbinden ($2 * 1,52 \text{ m} = 3,04 \text{ m}$; $3 * 1,52 \text{ m} = 4,56 \text{ m}$). Abstände dieser Größe wurden ganz offensichtlich so peinlich genau vermieden, dass dieses Verhalten zu markanten Ausschlägen in beiden Funktionen führte.

Möglicherweise erfasst man mit diesem Wert aber auch genau die „Überschneidung“ zwischen ursprünglicher Anlageregeln und den Regeln, die bei den späteren Störaktionen zur Anwendung kamen. Bei $L(r)$ war ja ein erster Anstieg der Abstände bereits bei 1,32 m bis 1,39 m zu bemerken (s. o. Abb. 2.19), während danach, bis zu 1,61 m eine Art Plateau lag. Wenn nun die erste Nutzungsphase Abstände kleiner als etwa 1,64 m vermied (ebd.), die späteren Störer dagegen häufiger noch Abstände von nur 1,33 m besaßen, würden beide Muster zu einer Vermeidung von Abständen in der Größe von etwa 1,52 m führen. In jedem Fall zeigt der Graph $g(r)$ für die Halde erstaunlicherweise keine weiterreichende Regelmäßigkeit in Bezug auf die Abstände. Vielmehr liegt das Regelmäßige hier in der Vermeidung von bestimmten Abständen.

Aus der Obergrenze der letzten signifikanten Inhibition bei 4,6 m ergibt sich zugleich die *Korrelationsreichweite*: KW beträgt demnach 4,6 m. Die Regelmäßigkeit ist also nur in einem wesentlich kleineren Umkreis um die Schächte noch erkennbar. Und sie ist vor allem mit dem Vermeiden von Abständen (dem Vielfachen von ca. 1,52 m) verbunden. Die späteren Störungen machen sich demnach durch zwei Effekte bemerkbar. Einerseits erhöht sich die Nahordnung wegen der peniblen Beachtung der Abstände zu den rings um den neuen Schacht herumliegenden Vorgängern. Andererseits wird die weiterreichende Regelmäßigkeit so verwischt, dass sie nicht mehr an die Reichweite des ursprünglichen Musters heranreicht.

Der *Vergleich* zwischen beiden Untersuchungsflächen ist besonders aufschlußreich. In der Kiesgrube gehen die Belege für die Regelmäßigkeit ausschließlich auf die Beachtung bestimmter Regelabstände zurück. Bis zu den mittelbaren Nachbarn siebter Ordnung ist stets nur eine „positive“ Bezugnahme der Schächte auf ein weitreichendes Ordnungsmuster zu erkennen. Dagegen ist die Korrelationsreichweite in der Halde quasi auf einen „negativen“ Bezug gegründet. Hier liegt also ein deutlicher Unterschied zwischen Halde und Kiesgrube. Zudem kann das Muster in der Halde als Ergebnis der Störung eines regelmäßigen Gitters durch zufällige Einflüsse angesehen werden.

Als Abschluss der punktfeldstatistischen Analyse sei der Versuch gewagt, das vermutete Grundprinzip der Schachtverteilung in einem *mathematischen Modell* darzustellen (BADDELEY/TURNER 2006, 268ff: Funktion „*ppm*“).

Hat man ein Modell gefunden, dessen Eigenschaften mit dem Punktfeld vereinbar sind, besitzt man damit einen mathematischen Ausdruck für das grundlegende Planungsprinzip des neolithischen Bergbaus in Abensberg-Arnhofen. Dafür wird nicht mehr einfach die globale Punktdichte, auch Intensität genannt, betrachtet (Anzahl pro Flächeneinheit), sondern sie wird durch eine Intensitätsfunktion beschrieben, die jeweils die Dichte an einer Position beschreibt (vgl. STOYAN/STOYAN 1992, 255).

Eng damit verbunden ist die bedingte Intensitätsfunktion $\lambda(x,y)$ (engl. "conditional intensity": DIGGLE 2003, 43f.; BADDELEY/TURNER 2005, 22f). Ihr Funktionswert entspricht der Intensität an einer bestimmten Koordinate $k_{i(x,y)}$ im Raum unter der Bedingung, dass ein Punkt bzw. die Punkte des Punktfeldes bei k_j liegen. *Dort, wo keine Punkte liegen, sollte die bedingte Intensität eines Prozesses, der das Punktfeld korrekt beschreibt, daher im besten Fall Null betragen.* Da man mit diesem Vorgehen auch den Raum zwischen den Punkten des Feldes beschreiben will, wird zunächst ein feines Raster an zusätzlichen Punkten, ein sogenanntes Quadraturschema, über das Punktfeld gelegt (BADDELEY/TURNER 2006, 302ff: "quadscheme"). Hier wird die Rasterweite 0,2 m als ausreichend betrachtet. Danach berechnet man an allen diesen Punkten den Wert, den die Intensitätsfunktion des vermuteten Modells annimmt. Dafür unterteilt man den Raum in sinnvoll kleine Flächen, und berechnet jeweils für diese kleinen Flächen $\lambda(x,y)$. Kartiert man diese Berechnung in Form einer Isolinienkarte (vgl. zu Isolinienkarten 4.1.2.), kann man gut vergleichen, ob sich die niedrigen Werte dort befinden, wo sie es sollten, nämlich in den unbesetzten Arealen zwischen den Punkten. Im umgekehrten Fall, bei höheren Funktionswerten in unbesetzten Arealen ergibt sich nach dem vermuteten Modell die Erwartung eines zum Feld gehörenden Punktes. Anders formuliert, die Gültigkeit der angenommenen Regel ist umso geringer, je höhere Werte in einem unbesetzten Areal auftreten.

Ausgangspunkt bei diesem Vorgehen ist die Überlegung, welches *Punktfeldmodell*, und damit welche bedingte Intensitätsfunktion, zur Anwendung kommen soll (allgemein zu Punktfeldmodellen: STOYAN/STOYAN 1992, 332ff.; DIGGLE 2003, 63ff.). Dafür kann man aus den Ergebnissen der Punktfeldstatistik ableiten, welche Eigenschaften das Verteilungsprinzip des Punktfeldes aufweist, und ein entsprechendes Modell wählen.

Die bisherige Auswertung ergab für die beiden Untersuchungsflächen unterschiedliche Informationen bezüglich der zu vermutenden Modelle. In der Kiesgrube und der Halde lag ursprünglich das gleiche Verteilungsmuster vor. In der Kiesgrube sind seine Eigenschaften so gut erhalten, dass man das dahinterstehende Verteilungsprinzip noch gut erkennen kann.

Wenn es ein mathematisches Modell für dieses Punktfeld gibt, das man überzeugend umsetzen kann, so hat man einen allgemeinen rechnerischen Ausdruck für die Organisation des neolithischen Bergbaus in Arnhofen gefunden. Die Informationen dafür sind aus den bisherigen Untersuchungen bekannt. Die Schächte wurden in bestimmten Regelabständen angelegt. Gesucht wird also ein auf Inhibition aufbauendes Verteilungsmodell. Modelle die auf Zufalls- bzw. Poissonprinzipien basieren, fallen daher ebenso aus, wie solche, die stärker zusammengedrückte Verteilungen („cluster“) in irgendeiner Art beschreiben. Zwar rückte man die neuen Schächte so nahe an die alten heran, wie es nötig war, um das Flöz im Untergrund möglichst gut auszubeuten, gleichzeitig aber beachtete man (verschiedene ähnliche) Regelabstände.

Es wirkten also zwei einander entgegengesetzte *Faktoren bei der Positionierung* der Schächte, die man kurz mit den Schlagworten „Abstoßung“ und „Anziehung“ beschreiben kann. Man könnte auch sagen, die Abstoßung nimmt mit der Entfernung zwischen den Punkten ab. Damit fallen auch Punktfeldmodelle aus der Familie der einfachen Inhibitionsprozesse weg, die auf unverändert starke Abstoßungen setzen (z. B. sog. Hard-Core-Modelle).

Es wäre besonders interessant, mit einem Modell den zeitlichen Aspekt der Schachtplatzierungen modellieren zu können. Aufgrund der intensiven Nutzung der Punktfeldstatistik in der Ökologie gibt es auch Modelle, bei denen die Reihenfolge der Punktplatzierung eine Rolle spielt, sog. einfache sequentielle Inhibitions-Felder (engl. ‘simple sequential inhibition‘; STOYAN/STOYAN 1992, 333; vgl. DIGGLE 2003, 72ff.). Bei den meisten wird jedoch keine veränderliche Abstoßung berücksichtigt. Und zudem können, entsprechend der biologischen Anwendungssituation, Punkte, die bestimmten Verteilungsregeln des Modells widersprechen, bei solchen Modellen „sterben“. Im hier bearbeiteten archäologischen Fall verbleiben aber alle Objekte im Punktfeld, denn ein einmal angelegter Schacht beeinflusste auch die Abbauorganisation, wenn er aufgegeben wurde.

Nach Konsultation des Handbuchs zur verwendeten Software wurde hier ein sog. *Softcore-Modell* gewählt (BADDELEY/TURNER 2006, 76f.: „Softcore“). Bei diesem Modell handelt es sich um ein sequentielles Inhibitions-Modell (STOYAN/STOYAN 1992, ebd.), bei dem die Punkte nacheinander (sequentiell) auf der Untersuchungsfläche platziert werden und die Abstoßung (Inhibition) zwischen ihnen mit zunehmenden Punktabständen kontinuierlich abnimmt.

Interessanterweise kann dieses Modell mit variablen Kreisradien, also variabler Abstoßung, wie sie hier durch die unterschiedlichen Regelabstände belegt ist, verbunden werden.

Das Verhalten des Modells wird nur von einem Parameter *kappa* gesteuert, der lediglich für Werte zwischen Null und Eins sinnvolle Ergebnisse liefert (BADDELEY/TURNER 2006, ebd.). Bei Werten nahe Null tendiert die Punktverteilung zu einem Hard-Core-Modell, also einem Modell mit konstanter Abstoßung. Für *kappa* gegen Eins ergibt sich wieder ein Poissonfeld. Da für die Kiesgrube jegliche Affinität zu Poissonverteilungen abgelehnt werden kann, wurde experimentell ein Parameter zwischen diesen Extremen gesucht, der ein möglichst gut mit dem Punktfeld vereinbares Modell liefert. Bei *kappa* = 0,5 ergab sich das überzeugendste Ergebnis.

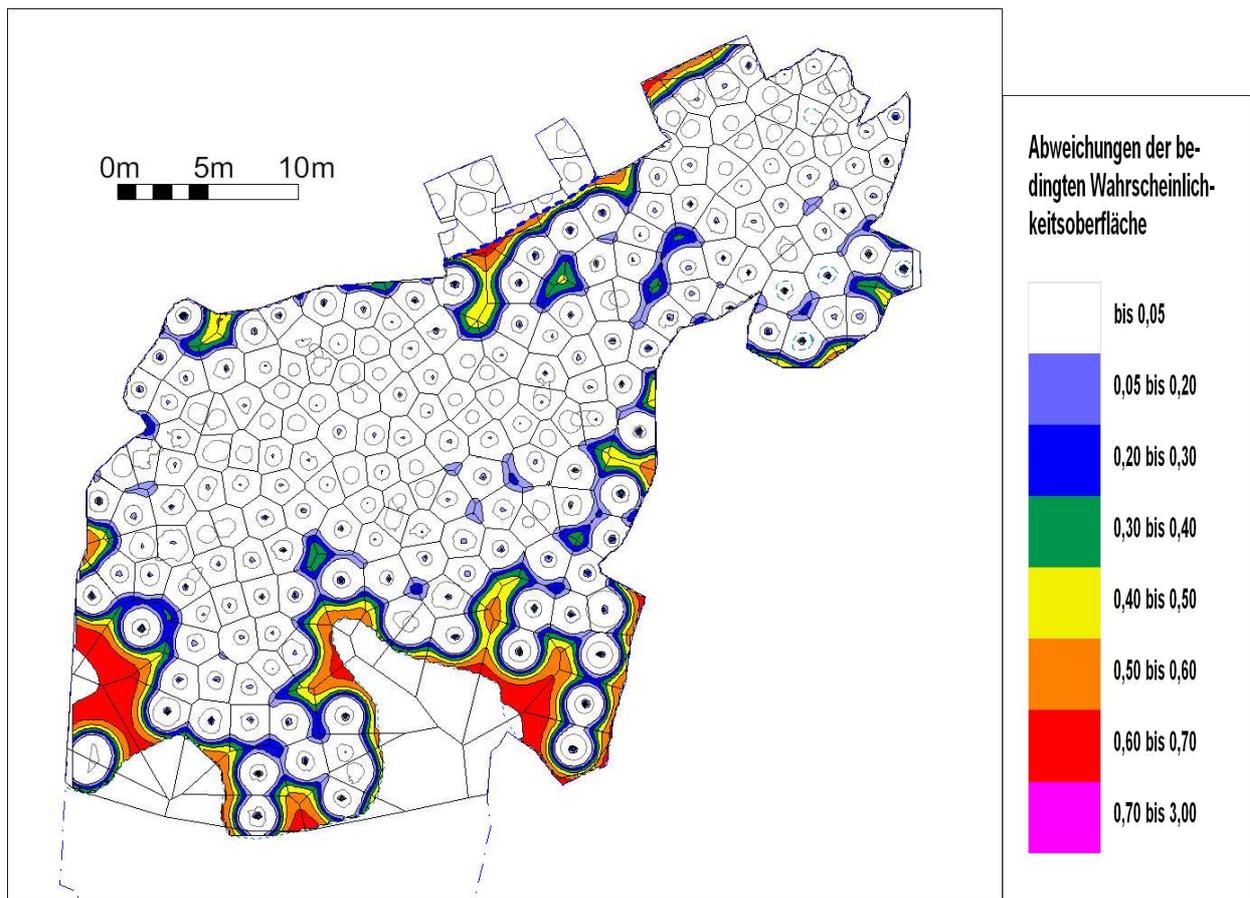


Abb. 2.24: Abensberg-Arnhofen - Punktfeldstatistik. Bedingte Intensitätsoberfläche für die Kiesgrube bei der Annahme eines Softcore-Prozesses ($\kappa = 0,5$; vgl. Text) als Verteilungsprinzip der Schachtanordnung. Niedrige Werte (weiß; $< 0,05$) deuten auf gute Vereinbarkeit von Softcoreprozess und Schachtverteilung. Mittlere Werte (blau und grün; $0,05 - 0,4$) stehen für eine eher geringe Vereinbarkeit. Sehr hohe Werte (Orange und Rot; $> 0,5$) legen eine Ablehnung für die betroffenen Regionen nahe. Zusätzlich wurden die Thiessenpolygone (schwarze Linien) eingeblendet. Beinahe alle Regionen mit gleichmäßiger Flächennutzung (etwa gleich großen Polygonen) lassen sich mit der Annahme eines Softcore-Prozesses vereinbaren.

Kartiert man die Funktionswerte der bedingten Intensitätsfunktion eines Softcore-Modells ($\kappa = 0,5$) für die Kiesgrube (Abb. 2.24), zeigt bereits der erste Blick, dass man damit das Prinzip der Schachtverteilung sehr gut beschreiben kann.

Die hohen bis extremen Werte, die vor allem an den Rändern der Untersuchungsfläche auftreten, stellen keinen Ablehnungsgrund für das Modell dar. Hier verliert das regelnde Prinzip seine Gültigkeit. Das betrifft die gesamte natürliche Südgrenze des Bergwerkes. Die mittleren bis hohen Werte entlang der östlichen Grabungsgrenze sind im südlichen Abschnitt vermutlich durch die etwas ungenaue Lokalisierung der Schächte aus der Grabung 1998 (s. o. 2.1.1.) verursacht. Und bei den nördlich davon, entlang des Nordostfortsatzes auftretenden Abweichungen könnten ähnliche Effekte eine Rolle gespielt haben. Hier ist die Grabungsgrenze stark verwinkelt.

Erklärungsbedürftig sind danach nur noch die *Abweichungen* an der künstlich gezogenen Nordgrenze (**Abb. 2.24: dick gestrichelte blaue Linie**) des Punktfeldes. Dort, wo die zwei Nischen von der Untersuchungsfläche abgetrennt wurden, liegt am Rand eine Anomalie, die sich mehrere Meter in die Fläche hineinzieht. Zu diesem Phänomen kann man auch die zwei Abweichungen im Innern der Grabungsfläche zählen. Sie liegen einmal 3 m und einmal 5 m südlich der künstlich gezogenen Nordgrenze, dort, wo der Nordostfortsatz in die zentrale Grabungsfläche übergeht. Der Grund für diesen Befund ist zunächst nicht ersichtlich. Genau in diesem Bereich wurde jedoch bei der geologischen Untersuchung eine große Doline entdeckt (s. u. 2.3. Abb. 2.52). Dadurch setzte hier das Flöz aus. Bei der vermutlich von Norden her erfolgenden Abbauausweitung musste es den neolithischen Bergleuten so vorkommen (zur Ausweitung s. u. 2.1.6.), als ob sie den Rand des Flözes erreicht hätten. Entsprechend entwickelte sich eine Situation wie am Rand des Bergwerkes, bei der der regelhafte Schachtbau aussetzte und stattdessen einzelne "Suchschächte" angelegt wurden. Die Voraussetzungen, die sonst die Grundlage für die mathematisch gut modellierbare Regelmäßigkeit bildeten, entfielen hier also. Diese Abweichungen sind damit ebenfalls kein Argument gegen die Verwendung des Softcore-Modells.

Bemerkenswerterweise lässt sich dieses Modell auch gut mit einem anderen Ergebnis zur Raumnutzung vereinbaren. Die Flächen mit den regelmäßigen, ungefähr gleichgroßen *Thiessenpolygonen* decken weitestgehend denselben Ausschnitt in der Kiesgrube ab, den auch das Modell gut erklären kann. Die Hinweise von dieser Seite sprechen ebenfalls dafür, dass man ein passendes Punktfeldmodell gefunden hat, und seine Eigenschaften gut mit der Punktverteilung zu vereinbaren sind.

Das Softcore-Modell mit $\kappa = 0,5$ ist also ein akzeptabler mathematischer Ausdruck für das grundlegende Planungsprinzip des neolithischen Bergbaus in Abensberg-Arnhofen. Ein Modell beschreibt immer nur eine schematisch idealisierte Variante des historischen Bildes. Durch die Verbindung des Modells mit den zufälligen und unerklärlichen Eigenheiten der historischen Überlieferung erst entsteht eine der Vergangenheit angemessene Geschichtsschreibung.

An dieser Stelle interessiert jedoch die wissenschaftliche Verallgemeinerung, da sie wissenschaftsphilosophisch gesehen das höchste Informationsniveau aller Aussagen besitzt.

Nach den bisherigen Ergebnissen war die *Organisation des Bergbaus* in Arnhofen ein komplexes Konzept. Grundlage war die geplante, weitgehend optimierte Ausbeutung des Hornsteinflözes aufgrund räumlich begrenzter Nutzungsrechte. Dabei wurde aus Sicherheitsgründen auf gewisse Abstände zwischen den Schächten geachtet. Je nach Situation *und* Vorliebe wählte die jeweils aktive Gruppe aber unterschiedliche Abstände zwischen einem neuen Schacht und seinen Vorgängern. Der Wechsel aus unterschiedlichen Abständen bei gleichzeitig möglichst nahem Aneinanderrücken der Schächte ergibt in der Summe das Muster, das das Softcore-Modell mathematisch beschreibt.

Bei der Halde ist dagegen die Suche nach einem Modell sehr kompliziert, wenn nicht sogar unmöglich. Hier liegt (mindestens) die Überlagerung zweier Prozesse vor: das ursprüngliche Muster und die anderen, eigenen Regeln gehorchenden, späteren Störungen. Aufgrund dieser Überlagerung wären Aussagen zur allgemeinen Organisation des Bergbaus, die man aus der Schachtverteilung der Halde ableitet, mit großer Unsicherheit behaftet. Da man nur in Ausnahmefällen festlegen kann, welche Schächte zum ursprünglichen Muster, und welche zu den "Störern" gehören, kann nicht entschieden werden, wo die bedingte Intensität eines Modells das ursprüngliche Muster abbildet und wo nicht. Hier wurde deshalb auf ein Modell zur Halde verzichtet.

Als *Ergebnis der punktfeldstatistischen Methoden* kann Folgendes festgehalten werden:

Die Untersuchung der nächsten Nachbarn (s. o. Abb. 2.17) ergab für die Kiesgrube, dass hier die 'Konkurrenz der Schächte um die Fläche' (vgl. DIGGLE 2003, 17) zu regelhaften Distanzen führte, die meistens etwas kürzer als 1,78 m, manchmal auch kürzer als 1,9 m waren.

In der Halde tritt ein sehr ähnlicher Wert auf, der mit 1,74 m nur unwesentlich kleiner ist. Dort allerdings liegen einige nächste Nachbarn regelhaft bei Abständen von nur 1,3 m bis 1,4 m. Dies ist ein erster statistischer Hinweis auf die Existenz eines Musters, das in der Kiesgrube weitestgehend ungestört erhalten blieb, während in der Halde spätere Schächte zu einer wiederum systematisch erfolgenden Überprägung führten.

Die Analyse der *Lückengröße* (s. o. Abb. 2.18) zeigte, dass in der Kiesgrube regelhaft Freiflächen zwischen 1,4 und 3,8 m Durchmesser auftreten, wobei 90 % kleiner als 2,9 m sind. In der Halde gibt es dagegen keine Lücken mit mehr als 3,2 m Durchmesser und hier sind 90 % sogar kleiner 2,4 m. Damit gibt es nicht nur einen weiteren Beleg für die spätere Überprägung im Haldenbereich, sondern auch einen Hinweis auf die Abstriche, die man dort gegenüber den ursprünglichen Regeln vornahm.

Bei späteren Eingriffen war man bereit, mindestens 0,14 m bis 0,18 m näher an die Vorgängerbauten heranzugehen, als es zuvor das Sicherheitsempfinden gebot. Außerdem ergibt der Vergleich zwischen beiden Flächen, dass die Anzahl der störenden Schächte in der Halde schätzungsweise ein Neuntel der Gesamtschachtzahl betrug. Die Untergrenze der regelhaften Lücken macht es wahrscheinlich, dass die Schächte kurz unter der Oberfläche maximal etwa 1,2 m Durchmesser besaßen, bevor ihre Wände durch das nach dem Auflassen eingefüllte Sediment unregelmäßig ausgeschlagen und verändert wurden (s. u. 2.1.5. Abb. 2.33 und 2.35).

Ein weiterer Graph zur Analyse der Lückengröße (Hazardrate) ergab (s. o. Abb. 2.19), dass die Lücken in der Kiesgrube in einem *regelmäßig abgestuften Muster* vorliegen. Die Stufen liegen bei 1,53 m, 1,88 m, 2,12 m, 2,35 m und 2,6 m. In der Halde sind kaum Stufen erkennbar. Hier wird die Größenverteilung der freien Flächen vor allem durch eine Sorte Lücken geprägt, die von einem r von etwa 1,68 m hervorgerufen werden. Die Abstufungen der Lückengröße in der Kiesgrube sind sehr einheitlich und liegen bei ca. 0,24 m.

Der Lieshout-Baddeley-Index (Abb. 2.20), der besonders sensibel auf Regelmäßigkeit reagiert, weist in der Kiesgrube einen größeren Ausschlag bei 1,59 m und einen kleineren bei 2,09 auf. In der Halde ergibt sich vermutlich wegen der Einheitlichkeit der Lückengrößen ein besonders extremer Wert bei $r = 1,72$ m; hier dürfte die Methode zu empfindlich für die extrem ausgeprägte Regelmäßigkeit sein.

Die weit verbreitete Funktion Ripley's K zeigt eindeutig (Abb. 2.21), dass beide Schachtverteilungen von einer *regelhaften Inhibition* geprägt sind, deren signifikante Grenzen sich beinahe exakt entsprechen (2,10 m bzw. 2,08 m). Dabei lässt die Vermeidung von Abständen in der Halde früher nach als in der Kiesgrube. Der Unterschied beträgt 0,19 m und besitzt damit ziemlich genau das Maß, das nach den Unterschieden bei den Lückengrößen zu erwarten war. Der letzte Zustand der Schachtverteilung in der Halde wurde davon geprägt, dass man neue Schächte bis zu 0,2 m näher an die Vorgänger heranrückte, als man es in der vorherige Abbauphase getan hatte.

Die Schachtabstände in beiden Verteilungen weisen die *gleichen Regelabstände* auf: Sie liegen bei 1,62 m, 1,86 m und 2,06 m in der Kiesgrube und 1,64 m, 1,86 m und 2,08 m in der Halde. Nimmt man noch die größeren der regelmäßigen Lücken in der Kiesgrube hinzu (2,12 m, 2,35 m und 2,6 m), die durch jeweils wenige Zentimeter kleinere Schachtabstände verursacht worden sein müssen (s. o.), kann man beide Reihen verknüpfen und damit die Kette von Regelabständen noch verlängern. Die Reihe der Regelabstände besitzt demnach Abstufungen von etwa 0,23 m +/- 0,03 m.

Geht man von diesem Befund aus, lässt sich die *Abweichung* zwischen den Schachtmittelpunkten, die von den Neolithikern zur Planung verwendet wurden, und denen, die hier zur Analyse der Schachtverteilung benutzt wurden, auf ca. +/- 0,06 m schätzen. Dass es sich dabei nicht um einen Zirkelschluss – von den modernen Mittelpunkten auf die alten und wieder zurück – handelt, wird dadurch belegt, dass die unterschiedlichsten Methoden zu den gleichen Ergebnissen führen.

Weiterhin ist ein *Unterschied* zwischen Kiesgrube und Halde von Bedeutung. Die Schachtverteilung in der Halde wird so von der peniblen Vermeidung der Abstände um etwa 1,55 m geprägt, dass sogar das Doppelte dieses Wertes zu einem signifikanten Ausschlag führt. Dieses Ergebnis verträgt sich wiederum gut mit den Radien der regelmäßig auftretenden freien Flächen (s. o.), die Werte bis knapp 1,6 m erreichen.

In die gleiche Richtung weisen die Resultate der Paarkorrelationsfunktion (Abb. 2.22 und 2.23). Bei der Kiesgrube kann man noch die nächste Stufe bei den Regelabständen mit 2,26 m erkennen. Sie fällt entsprechend der Erwartung aus der Lückengröße von 2,35 m etwas kleiner aus als diese (s. o.).

Aufgrund des Auftretens verschiedener Regelabstände ist die *Nahordnung* in der Kiesgrube scheinbar relativ gering, während sie in der Halde mehr als das Doppelte beträgt. Gleichzeitig ist die Kiesgrube jedoch über ihre gesamte Fläche von einem einheitlichen Ordnungsmuster geprägt, das auf das Verwenden von Abständen aus demselben Repertoire zurückgeht. In der Halde ist diese Ordnung dagegen so deutlich vom bereits bekannten Vermeiden bestimmter Abstände gestört, dass hier die Ordnungsbezüge nicht einmal halb so weit reichen. Die Kiesgrube zeigt also das ursprüngliche Muster nach der Aufgabe des organisierten Abbaus. Die Schachtverteilung in der Halde dagegen sah ursprünglich genauso aus, das Muster wurde aber durch spätere Eingriffe stark gestört. Die erhaltenen Aspekte des ursprünglichen Zustands werden nur noch bei einem Vergleich mit der Kiesgrube erkennbar.

Schließlich lässt sich das *Planungsprinzip*, das hinter der Organisation des neolithischen Bergbaus steht, gut mit einem punktfeldstatistischen Modell mit folgenden Eigenschaften beschreiben: einander folgende Objekte, die mit wechselnden Abständen angelegt wurden und deren Anordnung durch “wachsende Abstoßung“ bei kleiner werdenden Abständen geprägt ist.

2.1.4.3. Analyse der Triangulationslinienlängen

Neben der Punktfeldstatistik erlaubt die statistische Analyse der Triangulationsstreckenlängen einen Einblick in die Struktur der Schachtverteilung. Mit diesem Vorgehen ist es ebenfalls möglich, Eigenschaften der Planungsmuster zu identifizieren. Denn mit den Triangulationslinien kann man ein Grundelement von regelmäßigen räumlichen Objektanordnungen fassen, nämlich regelhafte Abstände zwischen direkten Nachbarn (vgl. ZIMMERMANN 1992, 108).

Dafür werden zunächst die Verteilungskennwerte der *Triangulationsstreckenlängen* diskutiert (**Tab. 2.2**).

Triangulation	Streckenanzahl	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Median	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Wölbung	Schiefe
Kiesgrube	626	0,311	13,055	2,508	2,285	1,260	0,502	24,181	4,095
Halde	475	0,482	4,063	2,052	2,021	0,522	0,255	0,474	0,202

Tab. 2.2: Abensberg-Arnhofen. Kennwerte der Triangulationslinienlängenverteilungen.
Alle kursiven Angaben sind in m.

Die 626 Triangulationsstrecken der *Kiesgrube* streuen zwischen 0,31 m und knapp 13,06 m. Da der Durchschnitt mit 2,51 m relativ weit unten innerhalb der Spannweite liegt, ist eine Rechtschiefe der Verteilung zu erwarten. Dieser Erwartung entspricht die Schiefe von 4,01. Gleichzeitig belegt dieser Kennwert, dass die Verteilung eine markante Untergrenze besitzt. Zu einer linkssteilen Verteilung passt, dass der Median mit 2,29 m deutlich kleiner ist als der Mittelwert. Die Streuung ist angesichts des hohen Maximalwertes von 13,06 m als gering zu bezeichnen (Standardabweichung 1,26 m; Variationskoeffizient 0,50).

Die Längenverteilung im *Haldenareal* sieht dagegen anders aus. Das überrascht nach den bisherigen Analysen nicht, im Gegenteil. Die im vorigen Abschnitt festgestellten Unterschiede sollten schließlich auch bei den Abständen der direkt benachbarten Schächte sichtbar sein. Die Verteilung der Halde besitzt die Extremwerte 0,48 m und 4,06 m. Sie ähnelt ansonsten stark einer Normalverteilung. So liegen etwa Durchschnitt (2,05 m) und Median (2,02 m) sehr nah bei einander, während Wölbung (0,47) und Schiefe (0,20) sehr klein sind. Die Streuung ist als sehr klein zu bezeichnen (Standardabweichung 0,52 m; Variationskoeffizient 0,26).

Demnach sieht es auf den ersten Blick so aus, als ob die Verteilung in der Kiesgrube eine extrem verzerrte und die in der Halde eine auffällig "normale" Normalverteilung sei.

Wie stark die *nachträglichen Veränderungen* durch die "Störer" bei der Schachtverteilung in der Halde wirklich sind (s. o. 2.1.4.2.), kann man durch den Vergleich mit der Kiesgrube erkennen.

Nach den bisherigen Ergebnissen sollte ein signifikanter Unterschied zwischen der Verteilung der Triangulationsstreckenlängen in der Kiesgrube und in der Halde bestehen. Das kann einfach mit einem Test auf Mittelwertsgleichheit, einem sogenannten t-Test überprüft werden (IHM 1978, 144ff.). Die entsprechenden Formeln und die Vorgehensweise werden weiter unten im Detail erläutert (s. u. 3.1.). Die dafür nötigen Kennwerte, Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl, sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen. Der Wert der Teststatistik t beträgt 7,4186. Bei einem zweiseitigen Test und 1099 Freiheitsgraden ($626 - 1 + 475 - 1$) liegt der kritische Wert für ein Sicherheitsniveau von 99,99 bei 5,0664. Die Teststatistik überschreitet selbst diesen Wert noch ($7,4186 > 5,0664$), weshalb der Unterschied zwischen den beiden Mittelwerten als hochsignifikant anzusehen ist.

Nach dem Testergebnis zu urteilen, handelt es sich um grundsätzlich *unterschiedliche Verteilungen*. Da aber bei den punktfeldstatistischen Untersuchungen einige Ähnlichkeiten nachgewiesen wurden, lautet die Schlussfolgerung anders: Die nachträglichen Veränderungen des ursprünglichen Musters in der Halde waren so stark, dass die Mittelwerte der Triangulationsstreckenlängen einen signifikanten Unterschied aufweisen.

Für den Unterschied gibt es eine gute *Erklärung*. Übernimmt man die oben bei der Auswertung der sphärischen Kontaktverteilungsfunktion $F(r)$ erörterte Überlegung (s. o. 2.1.4.2. Abb. 2.18), so wird verständlich, warum der Unterschied signifikant ausfällt. Danach kam auf acht ursprüngliche Schächte ein späterer "Störer". Bei einer völlig regelmäßigen Anordnung (Bienenwabemuster) von acht Punkten ergeben sich 14 Triangulationslinien. Setzt man einen weiteren Punkt in dieses Muster, kommen je nach Platzierung mindestens drei weitere Strecken hinzu. Und diese würden alle drei deutlich kürzer ausfallen, als die bisherigen. Ein Neuntel der Abstände in der Halde dürften solche Linien sein. Das erklärt, warum trotz des ursprünglich gleichartigen Abbaumusters (s. o. 2.1.4.2.) ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Mittelwerten besteht.

Die Länge der Triangulationsstrecken wird hier, genauso wie im vorangehenden Abschnitt, als Schachtabstand bezeichnet. Um die realen Abstände zu erhalten muss man einfach zwei halbe Schachtdurchmesser vom jeweiligen Wert abziehen, da die Strecken ja die Schachtmittelpunkte verbinden. Als Faustregel kann man hier einen Durchmesser annehmen, der etwas kleiner als 1,2 m (vgl. o. 2.1.4.2. Abb. 2.18) bzw. 1,17 m (a. a. O. Abb. 2.21) sein sollte. In ca. 4 m Tiefe belief sich der durchschnittliche maximale Durchmesser auf 1,01 m. Die Wände wurden aber bei der Verfüllung ausgeschlagen (s. u. 2.1.5.), die Schächte waren also ursprünglich noch schmaler.

Hätte man nicht bereits eine gute Vorstellung von der *Messungenaugigkeit* bei der Lokalisierung der Schachtmittelpunkte aus der Untersuchung von Ripleys K gewonnen (s. o. 2.1.4.2: $\pm 0,06$ m), könnte man sie nach diesem Wert auf maximal 0,16 m eingrenzen ($1,17$ m $- 1,01$ m = $0,16$ m). Ein Schachtmittelpunkt an der Oberfläche könnte also um die halbe Differenz gegenüber einem in 4 m Tiefe verschoben sein ($0,16$ m / $2 = 0,08$ m). Da plausiblerweise angenommen werden kann, dass sich ein Schacht nach unten etwas verjüngte, müsste man aber den Wert von $0,08$ m noch etwas verringern. Die beiden Schätzwerte von $0,06$ m und $0,08$ m sind sich sehr ähnlich und als sehr gute Annäherung an das gesuchte Phänomen der Messungenaugigkeit anzusehen. Diese Ähnlichkeit zeigt, wie sich Punktfeldstatistik und deskriptive Statistik der Schachtabstände gegenseitig stützen.

Nach der statistischen Beschreibung der Triangulationsstreckenlängenverteilungen werden sie mit einer *Histogrammanalyse* genauer untersucht. Die Klassenbreiten der Histogramme entsprechen 5 cm. Beide Histogramme besitzen am rechten Rand eine Residualkategorie, in die alle Abstände eingeordnet wurden, die gleich oder größer einem bestimmten Maximalwert sind.

Da die Triangulation alle Schächte verbindet, die nach einer bestimmten Definition als unmittelbare oder direkte Nachbarn klassifiziert werden, stellen diese Strecken nur einen Ausschnitt der Abstände dar, der bei der Punktfeldstatistik in die Graphen $L(r)$ und $g(r)$ einging. Finden sich in diesem Ausschnitt die Ergebnisse des vorigen Teilabschnitts 2.1.4.2. wieder, so zeigt dies, dass die Ergebnisse auch bei Verkleinerung der Datengrundlage stabil sind.

Zunächst wird die Verteilung der *Kiesgrube* betrachtet (**Abb. 2.25**). Dass sie eine deutliche Untergrenze besitzt, wurde bereits durch die hohe Schiefe klar.

Die durchgehend besetzten Klassen reichen von 1,30 bis 1,35 m bis zu 3,85 m bis 3,90 m. Die Klassen, in die mindestens zwei Prozent aller Strecken (12,5 Stück \sim 13 Stück) fallen, liegen zwischen 1,55 m und 2,55 m mit zwei Ausreißern bei 2,70 m bis 2,75 m und 2,80 bis 2,85 m. Als Mindestabstand kommen auch nach dieser Betrachtung Werte von etwa 1,4 m in Betracht. Zuvor nimmt die Klassenbelegung stetig ab. Verlängerte man den Trend zwischen 1,65 m und 1,45 m, so würde ein entsprechender linearer Trend bei ca. 1,4 m auf Null sinken.

Bei der Obergrenze ist kein so klarer Trend vorhanden. Je nachdem, ob man den Bereich zwischen 2,45 m und 2,65 m oder den zwischen 2,80 m und 3,90 m betrachtet, ergeben sich andere Obergrenzen. Wenn man jeweils eine Trendlinie durch die entsprechenden Teile des Histogramms legen würde, erhielte man als maximale Abstände zwischen unmittelbaren Nachbarn Werte von 2,60 m bis ca. 3,80 m.

Die (Regel-)Abstände wuchsen also nicht wesentlich über das als notwendig erachtete Maß hinaus. Das belegt auch die Obergrenze des mittleren Wertebereichs im Histogramm bei etwa 2,6 m bis 2,9 m.

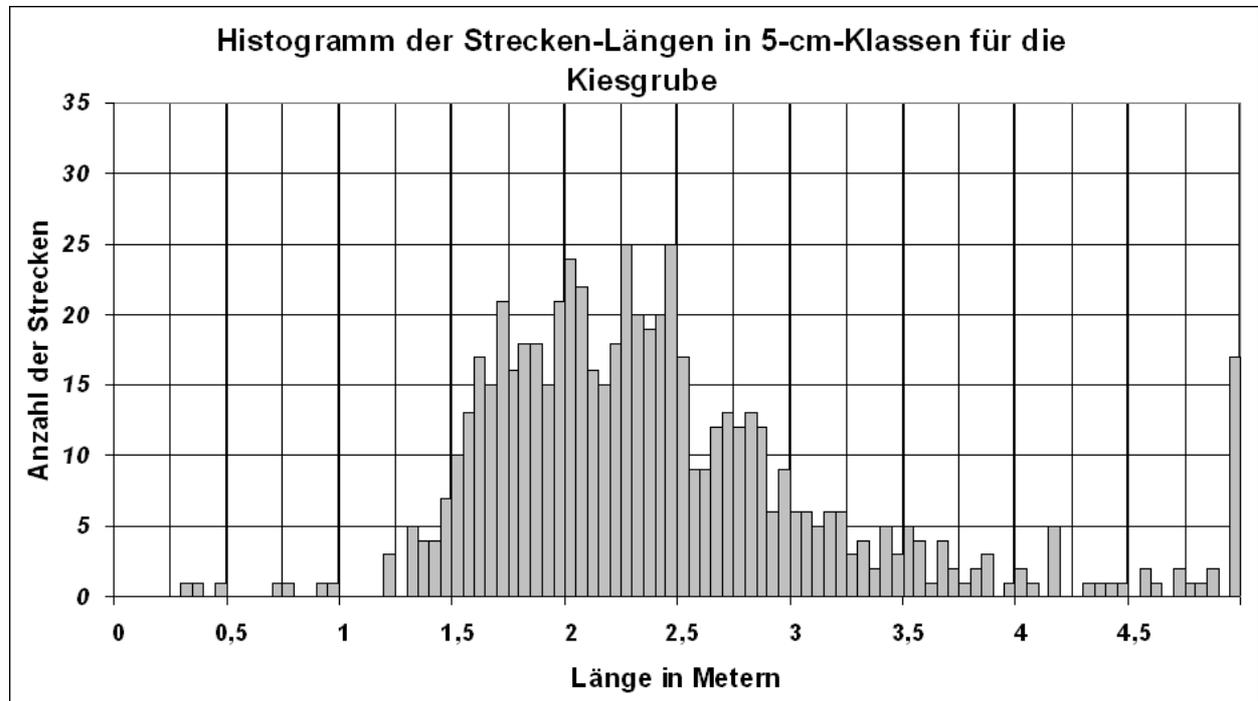


Abb. 2.25: Abensberg-Arnhofen. Histogramm der Triangulationsstreckenlängen in der Kiesgrube ($n = 626$) mit Klassenbreite 0,05 m. Die Klasse rechts außen ist die Residualkategorie ($> 4,95$ m).

Dass dennoch einzelne *größere Abstände* vorliegen, hat zwei Gründe. Einerseits kann es sich um ein methodisches Artefakt handeln. Als methodisches Artefakt können Strecken betrachtet werden, deren Zustandekommen durch die Grenzziehung der Untersuchungsfläche bedingt ist. Sie entstehen am Rande einer Untersuchungsfläche und liegen nicht zwischen unmittelbar benachbarten Punkten. Die "echten" Nachbarn dieser Punkte befinden sich außerhalb des Untersuchungsbereichs. So kommen bei künstlichen Grenzziehungen mit hoher Wahrscheinlichkeit Linien zwischen Objekten zustande, die nicht direkt benachbart sind, also größere Abstände besitzen als die realen direkten Nachbarn (vgl. ZIMMERMANN 1992, 108).

Damit tritt auch hier wieder ein Grenzeffekt auf, der aber diesmal nur teilweise korrigiert wurde. Zwar wurden die direkt an den Grabungsgrenzen liegenden Linien bei beiden Triangulationen entfernt und nicht weiter ausgewertet, aber auch die etwas weiter innen gelegenen Linien sind noch in einem gewissen Maß von diesem Phänomen betroffen.

Nur dort, wo echte Grenzen einer untersuchten räumlichen Verteilung mit denen der Triangulation zusammenfallen, sind die Strecken Abbild der prähistorischen Situation. Je größer der Anteil der künstlich gezogenen Untersuchungsgrenze im Verhältnis zur umschlossenen Fläche ist, desto stärker ist der Einfluss des beschriebenen Phänomens.

Der zweite Grund betrifft die langen Strecken am *Bergwerkssüdrand*. Sie sind kein methodisches Artefakt (vgl. o. 2.1.3. Abb. 2.11). Hier wurden immer seltener Schächte angelegt, da das Flöz in größere Tiefen abtauchte und deshalb immer schwerer zu erreichen war. Diese Situation führte zu wesentlich längeren Strecken als im Inneren des Bergwerkes. Bereits das Softcore-Modell hatte gezeigt, dass das sonst eingehaltene Planungsprinzip hier keine Gültigkeit mehr hatte. Die Existenz immer größerer Abstände am Südrand ist also nicht auf denselben Kausalfaktor zurückzuführen, wie bei den restlichen, kürzeren Strecken. Daher schließt sich der Bereich mit den immer weiter vergrößerten Abständen nicht kontinuierlich an den Rest der Verteilung an. Im Histogramm wird dies an der diskontinuierlichen Besetzung der Klassen größer 3,90 m erkennbar. Aber auch nach unten kann man einen Abschnitt ($< 1,30$ m) erkennen, der durch ungleichmäßig besetzte Klassen gekennzeichnet ist. Wahrscheinlich sollte man dazu auch noch den kleinen Gipfel bei 1,30 m bis 1,35 m hinzuzählen.

Diese “zu kurzen“ Strecken gehen auf *Schachtplatzierungsirrtümer* zurück. Sie sind nicht das Ergebnis der Aktivitäten von extrem wagemutigen oder gleichgültigen Bergleuten. Das kann man alleine aus dem Histogramm ablesen, ohne Plausibilitätserwägungen zum Bergbau zu bemühen. Wären sie keine Irrtümer, so sollten sie sich als Bereich mit kontinuierlich schwächer besetzten Klassen direkt an den Rest der Verteilung anschließen, weil sie dann auf der laxen Auslegung der normalen Regeln beruhen müssten. Da hier aber einzelne, nicht mit dem Rest der Verteilung verbundene Fälle auftreten, handelt es sich um Abstände zwischen Schächten, die unabhängig von Planungsregeln entstanden.

Sowohl nach unten wie nach oben besitzt also die Verteilung diskontinuierlich abgesetzte Bereiche. Dadurch wird der dicht besetzte zentrale Abschnitt deutlich hervorgehoben – und das verursacht die extreme Wölbung (s. o. Tab. 2.2: Wölbung 24,181).

Im Hinblick auf die *Regelabstände* ist besonders interessant, dass das Histogramm keinen eindeutigen, markanten Gipfel besitzt. Vielmehr weist es eine Reihe kleinerer Gipfel auf. Und diese sind alle beinahe gleich aufgebaut. Die Zahl der Abstände nimmt zunächst immer weiter zu, erreicht einen Höchstwert und geht danach zunächst zurück, um sogleich wieder zum nächsten Gipfel anzusteigen. Greift man die markantesten Gipfel heraus, stößt man auf Größen, die aus dem vorangehenden Abschnitt bekannt sind.

Die beiden am stärksten besetzten Klassen sind die von 2,25 m bis 2,30 m und von 2,45 m bis 2,50 m. In beinahe dem gleichen Abstand, der diese beiden trennt, liegt der nächst höchste Gipfel bei 2,0 m bis 2,05 m. Aber er ist schon etwas diffuser ausgeprägt als die beiden anderen. Hier sind drei benachbarte Klassen beinahe gleich stark besetzt. Ober- und unterhalb dieses Bereiches scheint es, als ob prinzipiell weitere Gipfel im gleichen Abstand folgen würden, so etwa bei 2,45 m bis 2,50 m und bei 1,80 m bis 1,90 m. Allerdings wären diese dann schon stark durch Ungenauigkeiten verwischt.

Dabei gilt es zu bedenken, dass die oben vermutete Messungenauigkeit von $\pm 0,06$ m ziemlich genau den hier auftretenden Verzerrungen von etwa einer Klassenbreite entspricht. Bei noch kleineren Abständen geht der allgemeine Trend zu immer schwächer besetzten Klassen. Allerdings gibt es hier nochmals zwei kleinere, markante Gipfel: einen bei 1,70 m bis 1,75 m und einen bei 1,60 m bis 1,65 m. Entgegen dem Trend ist bei 1,30 m bis 1,35 m nochmals ein letzter kleiner Gipfel zu verzeichnen.

Wie bereits angedeutet lassen sich die oben herausgestellten Regelabstände von 1,64 m, 1,86 m, 2,08 m und 2,26 m (s. o. 2.1.4.2.) problemlos mit den hier beobachteten Gipfeln gleichsetzen (1,60 m bis 1,65 m, 1,80 m bis 1,90 m, 2 m bis 2,05 m sowie 2,25 m bis 2,30 m). Differenzen von beispielsweise drei Zentimetern zwischen 2,08 m und der Klasse 2 m bis 2,05 m sind angesichts der Messungenauigkeit vernachlässigbar klein. Sie stellen kein Argument gegen die Gleichsetzung dar. Zusätzlich zu den bisher erkannten Regelabständen findet sich sogar noch ein weiterer genau dort, wo er nach Stufeneinteilungen von etwa 0,20 bis 0,23 m liegen sollte, nämlich bei 2,45 m bis 2,50 m. Das ist etwa 0,2 m rechts des Gipfels bei 2,25 m bis 2,30 m.

Das Histogramm der Triangulationsstreckenlängen passt nicht nur zu den bisher gewonnenen Erkenntnissen bei den Regelabständen, es erlaubt zudem die Vermehrung der bisherigen Beobachtungen um eine weitere. Die angenommene Abstufung wird durch diese Beobachtungen immer wahrscheinlicher. *Man plante also in der Kiesgrube mit einem Repertoire, das folgenden Regelabstände umfasste: 1,64 m, 1,86 m, 2,08 m, 2,26 m und ca. 2,47 m.*

Das belegt noch einmal deutlich, dass die Verursachung der Regelmäßigkeit nicht einfach aus der Befolgung eines bergbau-technischen Erfahrungswertes resultiert. Dann dürfte sich nämlich entgegen dem vorliegenden Befund nur *ein* Regelabstand in der Verteilung spiegeln. Existierten dagegen mehrere Abstände, so heißt dies, es gab bei den Neolithikern unterschiedliche Ansichten darüber, welcher Abstand der beste sei. Wüßte man nicht bereits aus den Tests auf Zufallsverteilung (s. o. 2.1.4.1.), dass es abgegrenzte Claims gegeben haben muss, so könnte man allein aus dem hier diskutierten Ergebnis die Aktivität unterschiedlicher Gruppen ableiten.

Nach den bisherigen Ergebnissen kann von vornherein erwartet werden, dass sich die Verteilung der Schachtabstände auf dem *Haldenareal* deutlich von der Kiesgrube unterscheidet (**Abb. 2.26**).

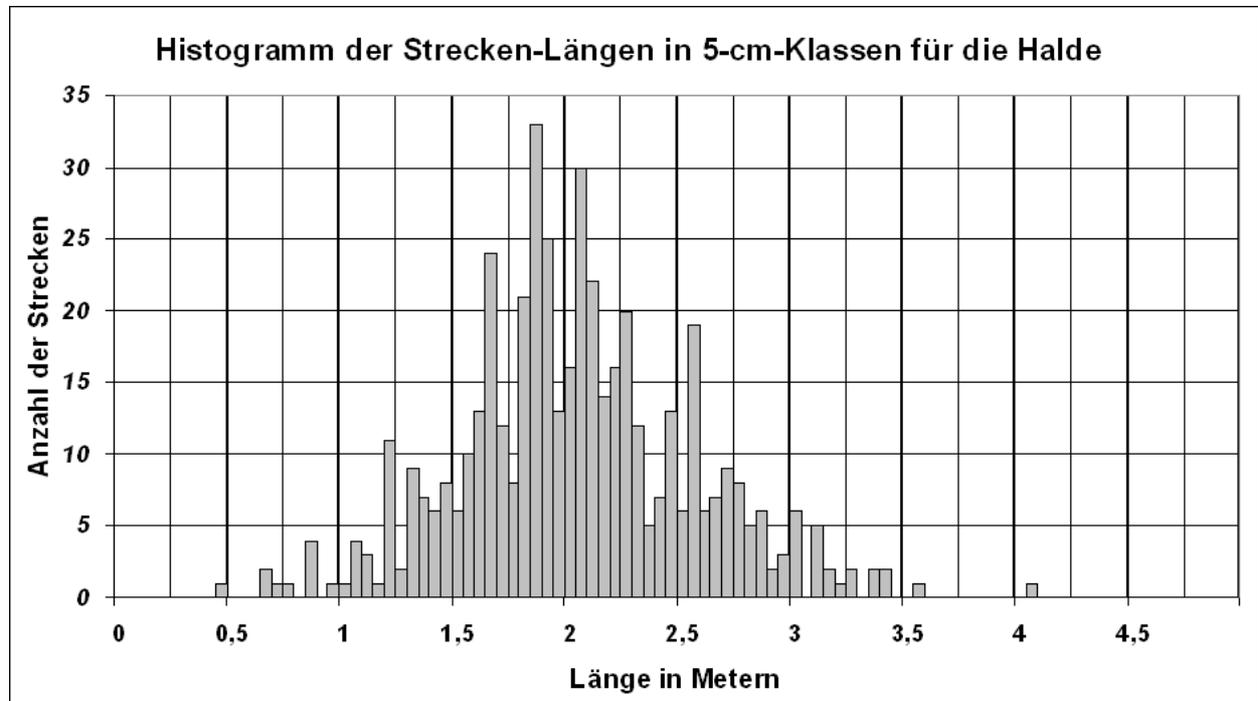


Abb. 2.26: Abensberg-Arnhofen. Histogramm der Triangulationsstreckenlängen in der Haldengrabung ($n = 475$) mit Klassenbreite 0,05 m. Es gibt keine Residualkategorie.

Orientiert man sich an der Schiefe (s. o.), sollte die Verteilung eigentlich kaum eine markante Untergrenze aufweisen. Die direkte Betrachtung der Verteilung anhand des Histogramms liefert hier Informationen, die an den Kennwerten selbst nicht zu erkennen sind. Die Klasse von 1,20 m bis 1,25 m weist entgegen allen Verteilungstrends eine hohe Besetzung auf ($n = 11$). Man erfasst also noch einmal genau die Schachtabstände, bei denen Plazierungsfehler für die Neolithiker gerade noch nicht erkennbar waren (vgl. o. 2.1.4.2.). Bei diesen Abständen konnte ein Bergmann auch beim Tiefergraben nicht bemerken, dass er zu nah an einem Vorgängerschacht lag, weil es gerade noch nicht zu Überschneidungen kam. Auch die Besetzung der Klassen von 1,30 m bis 1,40 m dürfte deshalb so hoch ausfallen. Die kontinuierlich besetzten Klassen erstrecken sich in der Halde zwischen 0,95 m bis 3,05 m. Die Untergrenze dieses Bereiches ist also gegenüber der Kiesgrube (1,30 m bis 1,35 m) um etwa 0,3 m nach unten verschoben, die Obergrenze sogar um 0,8 m (Kiesgrube 3,85 m bis 3,90 m). Auch die Breite dieses Bereichs ist mit 2,1 m um ca. 0,5 m geringer als in der anderen Verteilung ($3,90 \text{ m} - 1,30 \text{ m} = 2,6 \text{ m}$).

Die gesamte Verteilung erscheint dadurch nach links zu den kürzeren Abständen hin “verschoben“ und in der Mitte “zusammengequetscht“. Die extreme Zusammendrängung der Schächte macht sich auch daran bemerkbar, dass nur zwei Strecken größer sind als 3,5 m. In der Kiesgrube sind es 61. Die Klassen mit mehr als 2 % (9,5 Stück ~ 10 Stück) liegen zwischen 1,55 m und 2,35 m. Bei 1,75 m bis 1,80 m schiebt sich ein lokales Minimum ein, während sich unterhalb (1,20 m bis 1,25 m) wie oberhalb (bei 2,45 m bis 2,50 m und bei 2,55 m bis 2,60 m) noch weitere Ausreißer hinzugesellen.

Zwei Gründe verringern zusätzlich die *Zahl längerer Strecken*. Einmal ist das Untersuchungsareal nicht von “echten“ Außengrenzen umgeben, und deshalb kommen die dort auftretenden Streckenlängen nicht vor. Zum anderen führt der im Verhältnis zur umschlossenen Fläche kürzere Randbereich zum selteneren Auftreten von größeren Abständen. Das Histogramm weist daher kein so ausgezogenes Ende im oberen Wertebereich auf, wie das der Kiesgrube. Die verteilungsrelevante Obergrenze ist nicht einfach zu bestimmen. Man könnte sie je nach Auslegung bei 2,4 m oder 2,9 m ziehen. Bedenkt man, dass 90 % der Freiflächen kleiner als 2,4 m Durchmesser waren (s. o. 2.1.4.2. Abb. 2.16), scheint dieser Wert angemessen. Die Bereiche, die durch größere Abstände – und somit auch durch größere Lücken (!) – geprägt sind, könnte man als ungestörte Reste des ursprünglichen Verteilungsmusters ansehen.

Selbst wenn alle bisherigen Ergebnisse zur Existenz und Größe der *Regelabstände* unbekannt wären, spätestens bei diesem Histogramm sind sie nicht mehr zu übersehen. Das Histogramm zeigt keine gleichmäßig um einen Mittelwert gestreute Verteilung, sondern es besteht aus einer abgestuften Reihe kleiner Verteilungen, die sich jeweils um einen eigenen Mittelwert drängen. Beim Blick auf den Bereich zwischen 1,40 m und 2,50 m lassen sich die bisherigen Ergebnisse bestätigen. In diesem Abschnitt gibt es eine Reihe von Gipfeln, die jeweils *exakt* durch drei schwächer besetzte Klassen voneinander getrennt werden. Insgesamt sind bei diesem Histogramm sechs solcher Gipfel zu finden. Am markantesten fallen die mittleren vier aus: 1,65 m bis 1,70, 1,85 m bis 1,90 m, 2,05 m bis 2,10 m und 2,25 m bis 2,30 m. Die beiden randlich gelegenen Gipfel bei 1,45 m bis 1,50 m und 2,45 m bis 2,50 m werden zwar in ihrer Deutlichkeit etwas von benachbarten Klassen beeinträchtigt, sind aber ebenfalls noch gut zu erkennen. Die Stufen zwischen diesen Klassen sind stets gleich groß und umfassen je drei 5-cm-Klassen.

Bei den Abstufungen handelt es sich demnach vermutlich um das *regelmäßige Vielfache* eines bestimmten Wertes. Mögliche Werte, bei denen die beobachteten Verhältnisse auftreten könnten, liegen zwischen 0,2072 m und 0,2083 m. Wählt man aus diesem Schwankungskanal einen etwas höheren Wert von 0,2080, so lässt sich auf dieser Grundlage sogar noch der Gipfel bei 2,70 m bis 2,75 m erklären: 13 mal 0,208 m ist gerade 2,704 m.

Hier überspringt man mit einer Abstufung also nicht drei sondern vier Klassen. Es verbleiben dann nur noch wenige Gipfel, die man so nicht erklären kann. So sind selbst mit optimistischer Auslegung der Zahlen oberhalb von 2,80 m und unterhalb von 1,40 m keine weiteren Hinweise auf gleichmäßige Abstufungen mehr zu finden.

Zu *Unter- und Obergrenze* ist noch Folgendes zu bemerken. Die untere Schwelle wirft keine Probleme in Bezug auf die Abstufungen auf. Abstände unter 1,4 m zwischen den Schachtmittelpunkten – also von weniger als etwa 0,2 m zwischen den Schachtwänden (!) – waren nicht beabsichtigt, sondern gehen auf Platzierungsfehler zurück. Hier kann man also keine regelhaften Abstufungen mehr finden, weil diese Abstände nicht Ergebnis intentionalen Handelns sind.

Damit verbleiben nur noch zwei erklärungsbedürftige Abschnitte, nämlich der Gipfel bei 2,55 m bis 2,60 m und die Klassen größer als 2,80 m. Hierfür gibt es keine überzeugenden Erklärungen. Es sei hier nur eine Überlegung zur einer Schwäche der Methodik in Bezug auf das hier diskutierte Phänomen angeführt. Wie erläutert, verbindet die Triangulation Schächte, die nach einer bestimmten mathematischen Definition als unmittelbare oder direkte Nachbarn angesehen werden. Dass damit in der Regel genau diejenigen benachbarten Schächte erfasst werden, die von den Neolithikern auch als direkte Nachbarn angesehen wurden, geht aus den bisherigen Ergebnissen hervor. Es könnte aber auch sein, dass gerade in Bereichen, in denen die späteren Störungen und die erhaltenen Partien des ursprünglichen Musters aneinandergrenzen, die Methode andere Schächte verbindet. Möglicherweise weist sie hier Nachbarn aus, die zwar der mathematischen Definition genügen, aber den Neolithikern beim Vermessen gleichgültig waren, da die Abstände ihnen schon groß genug erschienen. Die Methode kann also in Ausnahmefällen auch zwischen solchen Schächten Linien erzeugen, deren Abstände größer sind als es die im Neolithikum angestrebten Distanzen waren. Und damit wären diese also auch nicht das Vielfache regelhafter Abstufungen. Mit dieser Überlegung lassen sich auch die letzten beiden, im Sinne des hier diskutierten Phänomens noch unerklärt gebliebenen Abschnitte (2,55 m bis 2,60 m und > 2,80 m) deuten.

Die *Resultate* der Histogrammanalysen und der Punktfeldstatistik zu den Regelabständen ergänzen einander. Fünf der oben vorgestellten Gipfel kann man gut mit denen in der Kiesgrube verbinden. Zwei stimmen genau mit den entsprechenden Klassen überein (2,25 m bis 2,30 m und 2,45 m bis 2,50 m), drei weitere liegen jeweils eine Klasse höher als in der Kiesgrube. Die Ableitung eines weiteren Regelabstandes von 2,45 m bis 2,50 m ist beim Histogramm der Kiesgrube nicht möglich.

Es gibt aber auch *paradoxe Ergebnisse*. So sind die Regelabstände beim Histogramm der Halde deutlicher zu erkennen, als bei dem der Kiesgrube. Das muss angesichts der für die Halde vermuteten Störungen verwundern. Warum zeigen sich die Regelabstände gerade hier so deutlich, obwohl man doch nach allen Aussagen zu “Störungen“, “verwischten Mustern“ und Ähnlichem erwartet hätte, dass sich ihre Existenz wesentlich undeutlicher abzeichnen sollte? Es konnte doch eindeutig gezeigt werden (s. o. 2.1.4.2.), dass die Schachtverteilung in der Halde stark durch eine Abbauphase gestört worden war, die nach dem eigentlichen systematischen Bergbau erfolgte. In der Kiesgrube dagegen gibt es kaum Überschneidungen und zu kurze Abstände, und wenn, dann vor allem im nördlichen Teil (s. o. 2.1.3. Abb. 2.11 und 2.1.4.1. Abb. 2.15). Warum betrafen die Störungen vor allem die nördlichen Bereiche der Ausgrabung? Und warum führte dies zu noch markanteren Regelabständen?

Dieser Befund erscheint zunächst unverständlich. Seine Erklärung ist aber bei den oben berechneten Werten für die Nahordnung bei $g(r)$ bereits vorweggenommen (s. o. 2.1.4.2.). Paradoxerweise bieten gerade die späteren Störungen die beste Erklärung für die hohe Nahordnung bzw. die besonders deutlich erkennbaren Regelabstände. Insbesondere bei den später zwischen den alten Schächten angelegten “Störern“ war es ja doch wichtig, alle umgebenden Schächte möglich exakt einzumessen, um den eigenen neuen Schacht optimal und gleichzeitig möglichst sicher zu platzieren! Die Triangulation umfasst wie gesagt diejenigen Schachtabstände, die zwischen unmittelbaren Nachbarn auftreten. Die späteren “Störer“ wurden nun immer (!) zu unmittelbaren Nachbarn einer ganzen Reihe von alten Schächten. Deshalb ist die hier untersuchte Verteilung besonders stark von den Abständen dieser Schächte zu den Vorgängerschächten beeinflusst. Und wie erläutert wurde gerade bei diesen Abständen besonders genau gemessen werden. Und diese sehr sorgfältige Einhaltung der Regelabstände erklärt wiederum, wieso sich bei diesem Histogramm die Klassen mit den Regelabständen so markant vom umgebenden Rest der Verteilung abheben.

Die Motivation zum Bergbau in einem bereits *aufgegebenen Grubenfeld* kann man mit der Geologie begründen. Das Flözniveau lag unter der Ausgrabungsfläche Halde nicht so tief (ca. 4 m), wie weiter im Süden (bis > 8 m). Man brauchte hier keine so großen Abstände, wie weiter im Süden auf der Fläche der Kiesgrube. Je tiefer ein Schacht in den Untergrund eingriff, desto höher wurde auch der Teil seiner Wand, der ihn von dem nur locker verfüllten toten Mann trennte und desto instabiler wurde dieser Wandabschnitt. Je tiefer man graben musste, desto gefährlicher war es zwischen alten Schächten einen neuen anzulegen. In der Halde war die spätere erneute Aufnahme des Abbaus einfach gefahrloser als in der Kiesgrube.

Dort, wo in Arnhofen das Flöz nicht so tief lag, war zudem der Arbeitsaufwand für einen Schacht wesentlich niedriger. Sowohl Arbeitssicherheit wie Arbeitersparnis ließen es also geraten erscheinen, für solche Abbauaktivitäten Flächen im Inneren des Bergwerks auszuwählen. Und solch ein Bereich wurde mit der Halde erfasst. Ähnliche Beobachtungen liegen auch von anderen jungsteinzeitlichen Bergwerken vor. So wurden in Krzemionki Zusammenhänge zwischen Schachtabständen und der geologischen Situation festgestellt (BORKOWSKI 1995, 111). Festzuhalten bleibt, beide Verteilungen der Triangulationsstreckenlängen, in der Halde wie in der Kiesgrube, sind die Summe mehrerer zusammengefasster Verteilungen. Jede Gesamtverteilung besteht aus einer Reihe von Einzelverteilungen, und diese gehen jeweils auf einen Regelabstand zurück.

Schließlich drängt sich noch eine wichtige Frage auf: Was hat es eigentlich mit den einheitlich *abgestuften Regelabständen* auf sich? Warum unterscheiden sich die Abstände immer wieder um den gleichen Betrag, in der Kiesgrube wie in der Halde, beim ursprünglichen Abbaumuster wie bei den später vereinzelt dazwischen angelegten Schächten?

Bevor es an die Beantwortung dieser Frage geht, ist eine *persönliche Stellungnahme* notwendig. Es sei ausdrücklich betont: Die folgenden Ausführungen waren zunächst nicht das Ziel der Untersuchung. Eine Beschäftigung damit ergab sich aus den augenfälligen Auffälligkeiten bei der Punktfeldstatistik und den Histogrammen. Diese und die unten vorgestellten Quantil-Quantil-Tests waren ausgewertet und beschrieben, bevor ich auf den im Folgenden dargestellten Sachverhalt stieß. Die teils berechtigten Vorbehalte und die Skepsis vieler Kolleginnen und Kollegen gegen (prä-)historische Metrologie sind mir dabei wohl bekannt und begegneten mir bei vielen Diskussionen. Ich selber teilte sie, bis mich die Ergebnisse dieses und des vorangehenden Abschnittes zumindest im Hinblick auf Arnhofen umstimmten. Erst nach längerem Zweifeln entschloss ich mich, die folgenden Absätze in diese Arbeit aufzunehmen.

Die zugrundeliegenden Daten sind mit solch an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht vom Zufall geprägt, dass man sich mit diesem Phänomen auseinandersetzen muss. Weiter unten wird außerdem noch gezeigt werden, dass man mit der Erforschung der räumlichen Bergbauorganisation als Zielsetzung geradezu zwingend zur Beschäftigung mit historischer Metrologie genötigt wird. Wenn man Planung wie im vorliegenden Fall belegen kann, dann *muss* auch gemessen worden sein. Die konkrete Umsetzung von Planung ohne Messung(-en) ist unmöglich!

Eigentlich ist es naheliegend, was hinter *gleichmäßig abgestuften Distanzen* steckt. Wenn es sich nicht um ein prähistorisches Phänomen handeln würde, wäre man sofort geneigt, ein Messsystem mit Längeneinheiten zu vermuten. Ein solches System wurde schon vor Jahrzehnten vorgeschlagen (THOM 1974; vgl. ROTTLÄNDER 1999). Die in der englischsprachigen Forschung in den 1960ern und 1970ern geführte Debatte über das sogenannte “megalithische Yard“ (vgl. zahlreiche Beiträge in HODSON 1974), kurz *mY*, wurde hierzulande weitestgehend mit distanzierter Gelassenheit aufgenommen, wenn nicht gar ignoriert. Die durchaus vorhandenen Schwächen bei der Vermessung neolithischer Baureste zur Datenaufnahme waren der eine Hauptgrund (vgl. z. B. RASCH 1992), warum man die Resultate nicht ernst nahm. Die englische Forschung machte sich allerdings die Mühe, die Berechnungen von Thom durch Mathematiker überprüfen zu lassen; demnach war zumindest die statistische Methodik einwandfrei (ROTTLÄNDER 1999).

Hinter den methodischen Problemen verbirgt sich aber noch ein *geschichtsphilosophischer Aspekt*. Scheinbar prägte bis vor wenigen Jahren auch bei den Archäologen noch eine Sicht das Bild der Vergangenheit, die man heute als primitivistischer Diskurs bezeichnen würde. Vereinfacht gesagt, man traute den prähistorischen Menschen auf “wissenschaftlichem“ Gebiet wenig bis gar nichts zu, oder behauptete, man könne oder dürfe dazu nichts sagen. Ein gutes Beispiel dafür ist die Archäoastronomie mittelneolithischer Kreisgrabenanlagen in Mitteleuropa. Seit den 1980er Jahren stießen Archäologen bei diesen Bauwerken vermehrt auf Anzeichen astronomischer Kenntnisse (Wintersonnwendvisuren u. ä.). Diese Hinweise wurden aber zunächst auch nur sehr skeptisch betrachtet. Symptomatisch ist, dass man die Auseinandersetzung mit der immer erdrückender werdenden Beweislast zunächst einem Geophysiker überließ (vgl. BECKER 1989; ders. 1996). Noch 1990 behandelte Petrasch in seinem Überblick zu den Kreisgrabenanlagen diese Aspekte nicht (ders. 1990).

Um die Jahrtausendwende kippte die ganze Diskussion schlagartig mit der Auffindung der sogenannten Sternenscheibe von Nebra (vgl. MELLER 2004). Jüngst wurden von Teams aus Archäologen und Ingenieuren bei mittelneolithischen Kreisgrabenanlagen selbst Sternuntergangvisuren in Palisadenlücken vermutet (KASTOWSKI et al. 2005; ZOTTI 2005). Dabei sind die Holzpalisaden bestenfalls aus Standspuren und Fundamentgräben zu erschließen. Dass die prähistorischen Menschen in Mitteleuropa mindestens seit etwa 5000 v. Chr. die Vorgänge am Nachthimmel über ihren Köpfen genau beobachteten, kann heute als bewiesen angesehen werden. Angesichts der astronomischen Kenntnisse von nichteuropäischen traditionellen Gesellschaften sollte dies eigentlich niemanden verwundern. Nur wer sich noch nie mit den entsprechenden Beobachtungen der Völkerkunde zur Astronomie in traditionellen Gesellschaften auseinandergesetzt hat, wird von dieser Feststellung überrascht sein.

Schon vor dem Hintergrund der ersten Erkenntnisse zu den astronomischen Visuren bei der ellipsoiden Kreisgrabenanlage von Meisterthal vermutete Becker übrigens: “Zur Absteckung der Brennpunkte und Ermittlung der Achsenlänge der Ellipse muss außerdem ein Maßsystem existiert haben: [...] “ (ders. 1989, 32). In diesem Zusammenhang stellte er fest, dass der 26,60 m messende Abstand zwischen den beiden Brennpunkten der Ellipse von Meisterthal genau dem 32-fachen eines Maßes entspricht (exakt dem 32,075-fachen), das ihm als megalithisches Yard bekannt war. Auch die anderen Maße der Ellipse konnte er mit dieser Einheit verbinden (Länge 54 *mY* und Breite 43,5 *mY*). Erst von den nach diesen Maßeinheiten erschlossenen Ellipsenbrennpunkten aus ergeben sich die astronomischen Sonnwendvisuren der Meisterthaler Anlage. Diese Punkte sind sonst durch keinerlei archäologischen Befund markiert. Die Skepsis der Archäologie gegenüber dem *mY* war ihm vermutlich als Naturwissenschaftler nicht bekannt.

Becker fiel bei den Abmessungen zudem auf (a. a. O.), dass seine Ergebnisse so unwahrscheinlich waren, dass es sich kaum um Zufall handeln konnte. Eine weitere Überprüfung der Meisterthaler Ellipse ergab, dass ihre Form um weniger als 1 % vom idealen Linienverlauf einer Ellipse mit diesen Maßen abweicht (ders. 1996, 102). Bemerkenswert ist zudem, dass die Gräben der Meisterthaler Anlage, die wahrscheinlich um 4800 v. Chr. angelegt wurde (BECKER 1996, 103; LÜNING 2002, 128 Abb. 220a), zur Zeit der Münchshöfener Kultur z. T. noch einmal nachgegraben wurden (BECKER 1996, 103 u. 111). Damit schmilzt der zeitliche Abstand zwischen den hier untersuchten Schachtverteilungen und der Kreisgrabenanlage von etwa 600 Jahren auf vielleicht 100 bis 200 Jahre.

Festzuhalten bleibt, schon vor knapp 20 Jahren wurden in Mitteleuropa Beobachtungen zur *prähistorischen Metrologie* gemacht. Ausgehend von einer völlig anderen Datengrundlage wurde bei einem grundverschiedenen Bauwerk in unmittelbarer zeitlicher und räumlicher Nachbarschaft zu Arnhofen eine Maßeinheit beobachtet. Die Maßeinheit wurde mit dem sogenannten megalithischen Yard in Verbindung gebracht. Während die damals noch kritisch beäugten Hauptaussagen zur Archäoastronomie heute als wissenschaftliche Pionierleistung dastehen, wurde der Aspekt prähistorischer Maßeinheiten seitdem nur selten aufgegriffen.

Eine Ausnahme von der Zurückhaltung beim Thema neolithische Metrologie ist Jens Lüning (ders. 2005a, 157). Bei Überlegungen zum bandkeramischen Hausbau bemerkte er: “Es ist gar kein Zweifel möglich, dass auch die Bandkeramiker ein Zahlensystem, Rechenverfahren und Meßgeräte gehabt haben, [...] “(ebd.). Da die hier untersuchten Befunde zumindest in der Mehrzahl dem frühen Jungneolithikum zuzuordnen sind (s. o. 2.1.2.), müsste das dafür verwendete Messsystem ebenfalls aus dieser Zeit stammen. Damit wäre es etwa sieben Jahrhunderte jünger als das von Lüning erwogene System.

Durch die mittlerweile regelhafte Erfassung prähistorischer Baureste und -fundamente in digitalen Plänen und deren entsprechend einfache Untersuchung im Hinblick auf Maßeinheiten mittels GIS könnte das von Lüning angesprochene Thema “Baumaße“ bald ein ähnliches Interesse erfahren, wie im Augenblick die Archäoastronomie.

Wie gesagt wurde die statistische Auswertung der Schachtverteilungen nicht unternommen, um eine *Maßeinheit* zu finden, sondern um die neolithische Abbauorganisation zu klären. Durchdenkt man aber die Fragestellung “Organisation des Bergbaus“ kurz, wird klar, dass man bei ihrer Erforschung zwangsweise (!) auf Maßeinheiten stoßen musste, wenn sie existierten. Kann man beweisen, dass es eine neolithische Vermessung gegeben hat, so hat man damit auch die Existenz eines Maßsystems bewiesen. Denn die Planung eines räumlichen Phänomens kann aus logischen Gründen nicht ohne eine Maßeinheit auskommen: Es ist schlicht unmöglich eine Größe in einer Dimension ausdrücken zu wollen, ohne dafür eine Konvention zu benutzen, also ohne ein Maß zu besitzen. Wenn es aber Maßeinheiten gab, so ist ebenso zu erwarten, dass deren Vielfache und gebräuchlichste Teilungen immer wieder bei einer Vermessung auftauchen. Im vorliegenden Fall sollten also die Verteilungen der Abstände von diesen Distanzen geprägt sein. Kurz gesagt, die Untersuchung der Bergbauorganisation führte unbeabsichtigt aber auch unvermeidlich zur Auseinandersetzung mit einem möglichen Messsystem.

Wenn eine regelhaft organisierte Schachtverteilung vorhanden war, musste man unweigerlich also auch auf die Maßeinheit(-en) stoßen, auf der die geplante Regelhaftigkeit basierte. Der in den vorangehenden Teilabschnitten insgesamt acht Mal erfolgreich geführte Beweis der regelhaften Schachtverteilung ist gleichfalls der Beweis für die Existenz eines Messsystems (s. o. 2.1.4.1.: Polygonflächentest und Clark-Evans-Test; 2.1.4.2.: $G(r)$, $F(r)$, $\lambda(r)$, $J(r)$, $L(r)$ und $g(r)$). Und aus logisch zwingenden Gründen kann es ein Messsystem nur mit einem System von Maßeinheiten gegeben haben.

An dieser Stelle muss kurz ein beliebter Einwand beiseitegeräumt werden. Es könne sich doch um ein *individuell reproduziertes biometrisches Maß* handeln, also beispielsweise die jeweilige Größe eines Fußes eines der beteiligten Bergleute. In solch einem Fall würde sich allerdings durch die Normalverteilung der individuellen Fußgrößen (vgl. IHM 1978, 96) bei deren Vervielfachung und der neolithischen Messungenauigkeit eine Verteilung ohne (!) markante Gipfel ergeben. Auffällige Muster der hier vorgefundenen Art könnten durch die mehrmals multiplizierten Standardabweichungen der einzelnen Verteilungen gar nicht erst entstehen. Gleiches gilt analog für die individuellen Längen von Ellenbogen, Schrittweite etc. Zum Vermessen in Schritten ist noch zu bemerken, dass nicht einmal derselbe Mensch seinen Schritt auf wenige Millimeter genau reproduzieren kann (ROTTLÄNDER 1999, 198), geschweige denn Dritte.

Individuelle biometrische Maße scheiden also aus mathematischen Gründen als Erklärung der Abstufungen aus. Bei den hier untersuchten Verteilungen muss es sich dagegen um Maße gehandelt haben, die bis auf wenige Millimeter genau eingehalten wurden – ansonsten wären die charakteristischen Ergebnisse nicht zustande gekommen.

Man kann sogar den *Aspekt des Messsystems* näher bestimmen, der für die Verteilung der Distanzen maßgeblich gewesen sein muss. Wären die Abstufungen von etwa 0,208 m, um die es hier geht, selbst die Maßeinheit, so würde bei ihrem Vervielfachen auch die hier auf etwa +/- 6 cm geschätzte Messgenauigkeit vervielfacht. Bereits nach wenigen Vervielfachungen dürfte ein Histogramm keine erkennbaren Gipfel mehr zeigen, denn die Streuung würde mitmultipliziert (vgl. o.). Beispielsweise überschreitet die Streuung zwischen den Vielfachen beim Vervielfachen des Basiswerts bereits diesen Basisabstand ($4 * \text{Streuung von } 6 \text{ cm} = 24 \text{ cm}$; $24 \text{ cm} > 20,8 \text{ cm}$). In den hier vorgelegten Histogrammen zeichnet sich aber das Vielfache des gesuchten Quantums in Bereichen deutlich ab, für die es deutlich häufiger vervielfacht wurde. In der Kiesgrube tritt es erst beim Neun- bis Zwölffachen und in der Halde beim Acht- bis Elffachen von 20,8 cm auf. Markante Befunde müssten nach derartiger Vervielfachung bereits weitgehend verschwunden sein. Sie tun dies aber gerade nicht. Bis zum Dreizehnfachen (2,70 m bis 2,75 m) treten kaum Verzerrungen auf, die das Phänomen unkenntlich werden lassen. Das kann nur heißen, diese Abstufungen stellen nicht selbst die Maßeinheit dar, sondern es sind Teilungen eines Maßes. Dieses Maß war demnach ein Vielfaches von 0,208 m.

Diese Beobachtung lässt sich erstaunlich gut mit dem *mY* verbinden. Zuletzt wurde das sogenannte megalithische Yard von Rottländer erörtert (ders. 1999a, 1999b). Rottländer konnte übrigens das *mY* ganz ohne Messungen – also auf ganz anderer Grundlage als sein Urheber Thom – auch aus den bekannten und historisch abgesicherten antiken Maßeinheiten wie der Nippur-Elle und dem römischen Fuß ableiten. Beinhauer bemerkt dazu: “Alle diese rechnerischen Ableitungen und damit mathematische Kohärenzen zeigen, dass es sich hier nicht um Zufälle handeln kann, [...]“ (ders. 1999, 440).

Nach Rottländer beträgt das *mY* 0,82936 m (ebd.). Wie häufig bei metrologischen Systemen war es unter anderem in halbe und Viertelyards unterteilt. Das ist leicht einsichtig, da beispielsweise die Verwendung von Meßschnüren exakte (mehrfache) Halbierungen erlaubt. Ein Viertelyard ist demnach 0,20734 m. Diese Größe liegt genau im Schwankungsbereich des Wertes, auf dessen Vielfaches die Regelabstände in der Halde zurückgehen (s. o.). Und wie bereits erläutert, handelt es dort sich um die Teilung einer Maßeinheit, nicht um die Einheit selbst.

Zur Verdeutlichung sind die bisherigen Ergebnisse und die entsprechenden Teilungen und Vielfachen eines mY einander in **Tabelle 2.4** gegenübergestellt. Die Entsprechung zwischen den vorgefundenen Größen und den Vielfachen eines Viertel mY sind trotz aller Ungenauigkeiten der hier verwendeten Methode bemerkenswert. Besonders erstaunlich ist allerdings die Besetzung der Histogrammklassen.

Gipfel bei $\lambda(r)$	Kiesgrube		1,53		1,88	2,12	2,35	2,60		2,85
	Halde				1,78					
Gipfel bei $J(r)$	Kiesgrube			1,59		2,09	(2,32)			
	Halde				1,78					
steile Partien bei $L(r)$	Kiesgrube			1,62	1,86	2,06				
	Halde			1,64	1,86	2,07				
Histogrammklassen	Kiesgrube	Klasse		1,60 – 1,65	1,80 – 1,90	2,00 – 2,05	2,25 – 2,30			
		Anzahl (n = 626)		17	2*18	24	25			
	Halde	Klasse	1,45 – 1,50	1,65 – 1,70	1,85 – 1,90	2,05 – 2,10	2,25 – 2,30	2,45 – 2,50	2,70 – 2,75	
		Anzahl (n = 475)	8	24	33	30	20	13	9	
Megalithisches Yard	Teilung	1 mY	1 ¾ mY	2 mY	2 ¼ mY	2 ½ mY	2 ¾ mY	3 mY	3 ¼ mY	3 ½ mY
	Wert	0,8293	1,4513	1,6586	1,8662	2,0736	2,2806	2,4879	2,6952	2,9026

Tab. 2.4: Abensberg-Arnhofen. Vergleich der Regelabstände (Punktfeldstatistik) mit den regelhaft stark besetzten Histogrammklassen und dem Vielfachen des sogenannten megalithischen Yard. Alle kursiven Angaben in Meter. Wo sich die Histogrammklassen zwischen Halde und Kiesgrube nicht entsprechen, ist die Trennlinie zwischen beiden Zeilen gewellt. Wo sich die Klasse des Regelabstandes und das Vielfache eines Viertelyardes genau entsprechen, sind die Zellen grau unterlegt. Zu den Histogrammklassen siehe oben die Abbildungen 2.23 und 2.22. Eingeklammerte Werte der Punktfeldstatistik sind nicht signifikant.

Festzuhalten bleibt, in Arnhofen konnte bewiesen werden, dass bei der Planung des Bergbaus gemessen wurde. Das dabei verwendete Maß war selbst Teil einer größeren Maßeinheit. Diese Maßeinheit zeigt erstaunliche Ähnlichkeiten mit dem megalithischen Yard. Ob man die Einheit so nennen möchte sei dahingestellt, die Ähnlichkeit ist jedenfalls unübersehbar.

Es gibt sogar einen *statistischen Test*, mit dem man die Annahme überprüfen kann, die Histogramme zeigten Abstände, die auf das Vielfache eines bestimmten Maßes zurückgehen.

Wenn vermutet wird, dass sich eine Verteilung aus der Aneinanderreihung verschiedener Vielfacher eines bestimmten Quantum zusammensetzt, ist es möglich dies statistisch zu überprüfen (BROADBENT 1955). Dabei sollten die einzelnen Quantavielfache jeweils normalverteilt sein. Wenn Menschen versuchen, eine bestimmte Größe einzuhalten, kann man unterstellen, dass sich bei der statistischen Bilanz ihrer Versuche eine Normalverteilung ergibt (IHM 1978, 89ff.). Das gleiche gilt für das Einhalten verschiedener Vielfacher einer Maßeinheit.

Die in Frage stehende Verteilung bestünde dann aus lauter Unterverteilungen, die jeweils um ein Vielfaches des fraglichen Quantums streuen (BROADBENT 1955, 46 Fig. 1). Auch ohne mathematische Überlegungen ist dabei klar, dass die Streuung bei jeder der aneinandergereihten Verteilungen gleich ist und sich nicht mitmultipliziert. Sie geht ja bei jedem Versuch auf die gleiche Ursache zurück, nämlich den Menschen und seine physischen Grenzen beim Versuch der Einhaltung einer bestimmten Größe.

Eine archäologische Anwendung dieses Tests wurde von Aleksander Dzbynski durchgeführt (ders. 2004, 29ff.). Er konnte damit zeigen, dass die Gefäßvolumina schnurkeramischer Becher signifikant um das Vielfache eines Wertes von 0,17 l gruppiert sind. Bei der hier vorliegenden Ausgangslage ist dagegen zu überprüfen, ob man bei den Verteilungen der Streckenklängen der Kiesgrube und der Halde aus statistischer Sicht annehmen kann, dass sie jeweils aus der Überlagerung verschiedener Vielfacher des Quantums 0,20734 m bestehen.

Für diese Überprüfung wird auf die sogenannte *Quantum-Hypothese* von Broadbent zurückgegriffen (BROADBENT 1955). In seiner Studie erörterte Broadbent unterschiedliche Ausgangssituationen bezüglich der Bekanntheit verschiedener Informationen zu den einzelnen Meßwerten sowie den Teilverteilungen. Der vorliegende Fall entspricht einer Situation (a. a. O., 49ff. § 3.2), bei der das Quantum unabhängig von der Verteilung bekannt ist, die Messungen nicht den einzelnen Unterverteilungen zugeordnet werden können, die einzelnen Unterverteilungen sich gegenseitig überlappen und die Wahrscheinlichkeit, nach der eine Messung einem bestimmten Quantum-Vielfachen angehört, nicht bekannt ist. Der Abstand zwischen einem Gipfel und einem Tal in der Ausgangsverteilung wird dabei als δ bezeichnet. Da es sich um lauter gleichartige Normalverteilungen handelt, ist dementsprechend δ zwischen jedem Gipfel und dem nächstgelegenen Tal gleich groß. Der Abstand zwischen zwei Gipfeln beträgt daher 2δ . Das zu überprüfende Quantum entspricht also 2δ . Im vorliegenden Fall entspricht also δ einem Wert von 0,10367 m ($0,20734 \text{ m} / 2 = 0,10367 \text{ m}$).

Für den Test ist zunächst die Differenz z_i zwischen jedem Messwert x_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) und dem ihm am nächsten gelegenen Quantum-Vielfachen $r_j' * 2 \delta$ zu ermitteln. Da im gegebenen Fall die Ausgangsverteilung β selbst ein Quantum-Vielfaches ist, kann Broadbents Formel für diesen Fall (a. a. O.) folgendermaßen verkürzt werden:

$$z_i = x_i - (r_j' * 2 \delta).$$

Dabei wird r_j' ($j = 0, 1, 2, \dots, m$) so gewählt, dass z_i möglichst klein ausfällt. Man zerlegt dafür die Hauptverteilung beginnend bei 1δ in Abschnitte von der Länge 2δ und erhält die Einzelverteilungen von 0δ bis 1δ , von 1δ bis 3δ , von 3δ bis 5δ , von 5δ bis 7δ usw.

Bei der Suche nach einem Längenmaß-Quantum tritt das nullfache Quantum nicht auf, die erste Einzelverteilung von 0 bis 1δ muss also nicht erstellt werden. Nach diesem Schritt verfügt man über eine Reihe Einzelverteilungen, die wiederum aus einem bestimmten Anteil aller Messungen (n) bestehen. Da der Gipfel einer Einzelverteilung bei $2 * r_j' * \delta$ liegt, besitzt man folglich Einzelverteilungen mit den Gipfeln 2δ , 4δ , 6δ usw. Im Idealfall sollte jeder Gipfel dem Vielfachen des gesuchten Quantums entsprechen.

Die beiden Verteilungen der Triangulationsstreckenlängen muss man also jeweils bei $0,10367 \text{ m}$ ($1 * 0,10367 \text{ m}$), $0,31101 \text{ m}$ ($3 * 0,10367 \text{ m}$), $0,51835 \text{ m}$ ($5 * 0,10367 \text{ m}$), $0,72569 \text{ m}$ ($7 * 0,10367 \text{ m}$) usw. zerschneiden. Dann erhält man lauter Einzelverteilungen, die um $0,20734$, $0,41468 \text{ m}$ usw. streuen, also um je ein Vielfaches des Quantums $0,20734 \text{ m}$. Intuitiv kann man sich das ganze Vorgehen so vorstellen, als ob man das Histogramm in Abbildung 2.25 mit der Schere jeweils in der Mitte zwischen zwei Gipfeln (den Histogrammklassen aus Tab. 2.4) auseinanderschneiden würde. Das Ergebnis wären lauter Einzelverteilungen, die jeweils nur einen Gipfel besäßen, nämlich die Histogrammklasse aus Tab. 2.4. Nach dem Zerteilen repräsentiert jetzt jede Einzelverteilung ein bestimmtes Vielfaches (r_x') des Quantums (2δ). Man zieht nun von jeder Messung einer Einzelverteilung genau dieses Vielfache des Quantums ($r_x' * 2 \delta$) ab und erhält die gesuchten z_i . Beispielsweise entspricht r_x' bei $0,41468 \text{ m}$ dem Wert 2; von allen Messungen, die der Verteilung um $0,41468 \text{ m}$ zugeschlagen wurden, wird genau dieser Wert abgezogen und die Differenzen entsprechen dann der Streuung der Teilverteilung um den Wert $0,41468 \text{ m}$.

Für alle so erzeugten z_i berechnete Broadbent (a. a. O., 50) eine zusammengefasste Varianz (engl. "lumped variance") nach der Formel:

$$s^2 = \sum_i^n (z_i^2 / n).$$

Die Teststatistik, die mit einem kritischen Wert verglichen werden muss, ist der Quotient aus s^2 und der quadrierten Hälfte des Quantums, also δ^2 . Die entsprechenden kritischen Werte für bestimmte Signifikanzniveaus bei n Meßwerten legte Broadbent in einer Tabelle vor (a. a. O. 53, Table 3). Hat man s^2/δ^2 berechnet, muss man nur noch aus dieser Tabelle das Signifikanzniveau ablesen, mit dem man die Annahme einer auf Quanta zurückgehenden Verteilung akzeptieren darf.

Bei den beiden hier untersuchten Gesamtverteilungen wurden aus rechnerischen und quellenkritischen Gründen jeweils nur die *mittleren Verteilungsausschnitte* untersucht. Wie oben gezeigt (s. o. 2.1.4.2.), sind die unteren Abschnitte der Verteilungen von Fehlplatzierungen geprägt, gehen also nicht auf neolithische Messungen zurück.

Sie sind deshalb ungeeignet, um sie auf das Auftreten einer Maßeinheit hin zu untersuchen.

Die oberen Abschnitte der Verteilungen sind ebenfalls ungeeignet. Hier könnte die Triangulation auch Schächte verbunden haben, die von den Neolithikern beim Vermessen gar nicht berücksichtigt wurden, weil sie ihnen schon zu weit entfernt schienen. Es wurden daher mittig aus beiden Verteilungen die Abschnitte herausgetrennt, die jeweils am deutlichsten durch das in Frage stehende Phänomen geprägt waren.

Aus der Umsetzung der Rechenanweisungen ergaben sich folgende *Testergebnisse*. Bei der Kiesgrube reichte der Abschnitt von 1,76239 m (17 δ) bis 2,59175 m (25 δ) und umfasste vier Einzelverteilungen (Quanta von 18 δ , 20 δ , 22 δ und 24 δ) mit insgesamt 316 Triangulationslinien. Bei der Halde wurde ein Bereich zwischen 1,55505 m (15 δ) und 2,38441 m (23 δ) herausgetrennt, der ebenfalls vier Einzelverteilungen (Quanta von 16 δ , 18 δ , 20 δ und 22 δ) und 292 Triangulationslinien enthielt. Berechnet man für alle Einzelverteilungen die jeweiligen z_i und daraus dann s^2 , ergibt sich für die Kiesgrube ein s^2 von 0,00327 und für die Halde ein s^2 von 0,00264. Diese Werte sind durch $\delta^2 = 0,010747$ zu teilen ($0,10367^2$), und man erhält die Teststatistik s^2/δ^2 . Sie beträgt im Fall der Kiesgrube 0,3044 und bei der Halde 0,2457. Die entsprechenden kritischen Schwellen (Kiesgrube: für $n = 300$ ist $p(0,05) = 0,3050$; Halde: für $n = 250$ ist $p(0,001) = 0,2751$) legen eine Akzeptanz auf einem Sicherheitsniveau von 95 % für die Kiesgrube und 99,9 % für die Halde nahe.

Man kann also wohlbegründet behaupten, dass *die untersuchten Abschnitte der Verteilungen der Triangulationsstreckenlängen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit aus den Vielfachen eines Quantums von 0,20734 m bestehen*. Mit anderen Worten: bei der Anlage der hier untersuchten Befunde maßen die Neolithiker mit einer Maßeinheit, die vermutlich einem (geraden) Vielfachen von ca. 0,21 m entsprach.

Mit dem Broadbent-Test kann man auch noch einmal die *Präzision* der Schachtmittelpunktssetzung überprüfen – vorausgesetzt, bei den Schachtabständen wären nur die Vielfachen der Maßeinheit angestrebt worden. Dieses Vorgehen ermöglicht nämlich eine Schätzung der Varianz σ^2 , die in allen Einzelverteilungen auftritt. Das ist die Streuung der Einzelwerte um die angestrebten Quantavielfachen. Bei einem gegebenen Quotienten s^2/δ^2 kann man aus einer weiteren Tabelle einen Schätzwert entnehmen (BROADBENT 1955, 52 Table 2), der nur noch mit δ^2 multipliziert werden muss, um ein gute mathematische Schätzung für σ^2 zu erhalten. Die Wurzel aus σ^2 ist σ , die für alle Einzelverteilungen gleiche Standardabweichung.

Es ergibt sich für danach für die Kiesgrube eine Standardabweichung von 0,074 m und für die Halde eine Standardabweichung von 0,056 m bei der Einhaltung des Quantums.

Diese Werte sind den oben bei $L(r)$ gemachten Beobachtungen zur Präzision bei der Schachtmittelpunktssetzung sehr ähnlich (s. o. 2.1.4.2. +/- 0,06 m). Wiederum bestätigen sich Ergebnisse des Broadbent-Testes und der Punktfeldstatistik.

Der *Unterschied in der Meßgenauigkeit* zwischen beiden Flächen könnte auf verschiedene Gründe zurückgehen. So ist vorstellbar, dass man besonders bei den späteren “Störschächten“ in der Halde genauer maß, weil man vorsichtiger zu Werke gehen musste. Andererseits wurden ja bei den Schächten der Kiesgrube die Mittelpunkte in mehreren Metern Tiefe trianguliert, und bis zu diesem Niveau könnte der eine oder andere Schacht ganz leicht aus dem Lot gelaufen sein. Ein dritter Aspekt ist besonders bemerkenswert. Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Schachtmittelpunkte mit einer Messungenauigkeit von ungefähr +/- 0,06 m lokalisiert werden konnten. Die hier geschätzten Standardabweichungen von 0,074 m bzw. 0,056 m liegen in einer Größenordnung, die zu starken Verzerrungen einst genauerer Messungen geführt haben könnte. Damit aber diese Werte überhaupt auftreten können, muss die neolithische Meßgenauigkeit wesentlich höher gewesen – vielleicht sogar bis auf den Zentimeter genau. Jedenfalls kann die bisher vermutete moderne Ungenauigkeit bei der Festlegung der Schachtmittelpunkte jetzt relativ genau mit weniger als 8 cm bzw. weniger als 6 cm angegeben werden.

Der *Grund*, warum man die Maßeinheit in Arnhofen so gut erkennen kann, dürfte in der Art der vermessenen Objekte liegen. Ebenso wie sich die archäologische Untersuchung auf die Mittelpunkte der ehemaligen Schächte stützt, so dürften sich schon die Neolithiker die Mittelpunkte der (geplanten) Schächte als Messpunkte gewählt haben. Bei architektonischen Befunden ist zumeist unklar, wo die Vermessung der Baubefunde (Pfostenlöcher etc.) anzusetzen hat (SCHUBERT 1992, 292f.). Bei einer Raumaufteilung für (annähernd) kreisrunde Objekte genügte es damals wie heute den Mittelpunkt festzulegen, um später von diesem aus den Radius anzusetzen. Die Vermessung könnte mit Schnüren oder Seilen erfolgt sein, die entsprechend markierte Abschnitte besaßen. Dass es derartig markierte Seile gab, legt die Situation bei den Schächten der Schachtgruppe L 10 in der Kiesgrube nahe (s. u. 2.1.6.).

Abschließend zur Frage nach einer möglichen Maßeinheit ist noch zu klären, in welcher *Zeitstufe* sie zur Anwendung kam. Wie im Abschnitt zur Datierung erläutert (s. o. 2.1.2.), dürfte die regelhafte Abbautätigkeit, die mit den DFG-Grabungen erfasst wurde, überwiegend in die Zeit zwischen 4300 v. Chr. und 4100 v. Chr. fallen. In Meisterthal wurde eine gleich große Maßeinheit schon ab etwa 4800 v. Chr. verwendet. Die Maßeinheit wurde auch bei den “Störungen“ in der Halde noch benutzt. Wann diese Schächte angelegt wurden, kann (noch) nicht beantwortet werden.

Es kommt immerhin ein Zeitraum von über 1900 Jahren zwischen spätestens 4100 und 2200 in Frage. Noch zur Zeit der Glockenbecherkultur (ca. 2500 v. Chr. bis ca. 2200 v. Chr.) wurde in Arnhofen ja Bergbau betrieben (s. o. 2.1.2. und u. 4.4.).

Im Folgenden stehen wieder die *Regelabstände* im Zentrum der Betrachtung: Kann man aus der Untersuchung der Streckenlängenverteilung weitere Hinweise auf diese Basiselemente der Bergbauorganisation gewinnen?

Wären die Schächte von *Vollzeitbergleuten* angelegt worden, sollte sich ein bestimmter Effekt einstellen. Alle Schächte müssten dann einem einzigen Planungskonzept folgen, nämlich der Umsetzung eines stets gleichen Abstands aus Sicherheitsgründen. Wenn man nämlich einen in Vollzeitspezialisierung betriebenen Bergbau postuliert, verfügten die Bergleute alle über ungefähr das gleiche Wissen. Bei professionellem Abbau würde deshalb stets *ein* bestimmter, aus Erfahrung bekannter Abstand umgesetzt (vgl. o.). Bei der Ausbildung würde dieser Wert *allen* neuen Bergleuten gelehrt werden, so dass auch sie bei ihren Schächten denselben Abstand anstrebten. Das ergäbe eine Normalverteilung der Abstände, wobei der Mittelwert dem Erfahrungswert der Bergleute entspräche (vgl. IHM 1978, 7 und 89ff.). Dann müssten alle beobachteten Abstände um den angestrebten Wert schwanken. Selbst wenn sich dieser Wert mit der Zeit veränderte, etwa wenn bei immer tieferen Schächten immer größere Abstände notwendig wurden, ergäbe sich nur eine breiter gestreute Normalverteilung – sie besäße aber nach wie vor nur einen Gipfel. Dieser Zusammenhang kann aber nur bei einem ungestörten Abbaumuster beobachtet werden. Für die Klärung dieser Frage kommt also nur die Kiesgrube in Frage. Grundsätzlich gilt: Kann man dort zeigen, dass keine Normalverteilung vorliegt, so gibt es ein weiteres Argument gegen die *Vollzeitspezialisierung beim Bergbau*.

Wie bei der Analyse des Histogramms bewiesen werden konnte, gab es stets mehrere, deutlich voneinander abgesetzte Werte für den Abstand zwischen zwei Schächten. Dabei zeigte sich keine Beziehung zwischen der Lage der Triangulationslinien und ihrer Länge. Beispielsweise waren weiter südlich gelegenen Abstände trotz größerer Schachttiefen nicht länger, als die weiter nördlich. Ausgenommen davon sind aus verständlichen Gründen einzig die Linien direkt am Rand des Bergwerks. Das widerspricht bereits der Annahme eines vollzeitspezialisierten Bergbaus.

Deshalb wird an dieser Stelle noch einmal der Frage nachgegangen, welche *Art der Verteilung* bei den Streckenlängen vorliegt. Denn auch die Verteilungsart kann noch einmal Hinweise zur Organisation des Abbaus liefern. Dass es sich nicht um Poissonverteilungen handelt, wurde ausführlich belegt. Welche Verteilungen liegen jedoch stattdessen vor?

Für die Untersuchung der Verteilungsart wird diesmal zunächst nicht auf einen rechnerischen, sondern auf einen visuellen Test zurückgegriffen, den sog. *Quantil-Quantil-Test*. Bei rechnerischen Tests wie etwa dem Kolmogorov-Smirnov-Test ließe sich zwar einfach überprüfen (zum Test BLEYMÜLLER et al. 1998, 133ff.), ob eine Normalverteilung vorliegt. Man besäße aber keine weiteren Informationen über die Art des Unterschiedes zwischen einer Normalverteilung und der untersuchten Verteilung. Auf rechnerische Testvarianten wurde nur zurückgegriffen, wenn der visuelle Test Fragen offen ließ.

Beim Quantil-Quantil-Test kann man die Unterschiede sehen. Der Test wird graphisch so durchgeführt, dass für einen Verteilungsabschnitt (Perzentil) die empirischen Häufigkeiten eines bestimmten Meßwerts gegen die zu erwartenden Häufigkeiten bei einem normalverteilten Meßwert abgetragen werden. Die Erwartungswerte für die Häufigkeiten ergeben sich, wenn man mit den Parametern der vermuteten Verteilung (z. B. bei Normalverteilung: Mittelwert und Standardabweichung) ermittelt, wie viele Fälle welcher Größe in welches Quantil gehören. Diese Parameter berechnet die Methode einfach aus der vorliegenden empirischen Verteilung. Will man beispielsweise auf eine Normalverteilung testen, so ist zuvor die Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung nötig.

Für die *Darstellung* wird die X-Skala noch so transformiert, dass der Graph für diese Erwartung einer Geraden entspricht, d.h. der Rechner rückt die Quantile auf der X-Achse entsprechend auseinander oder zusammen. Danach plottet die Software die empirische Verteilung als Punktreihe nach Größe geordnet über den Graphen. Entsprechen sich Erwartung und Empirie, sollten die geplotteten Punkte weitgehend deckungsgleich mit dem theoretischen Graphen sein. Die Umsetzung erfolgte mit der Prozedur ‘Probplot’ der Software ‘SAS’ (von engl. ‘probability plot’; dt. ‘Wahrscheinlichkeitsgrafik’).

Bei der *Halde* wurde oben schon beschrieben, auf welche Weise diese Verteilung Ähnlichkeit mit einer Normalverteilung erlangte. Der Quantil-Quantil-Test zeigt eine große Ähnlichkeit zwischen der empirischen Verteilung und einer theoretischer Normalverteilung mit den gleichen Parametern (**Abb. 2.27**).

Nur am oberen Ende der Häufigkeitsklassen (ab dem 90 %-Perzentil) treten “zu lange“ Strecken auf. Die meisten längeren Strecken liegen jedoch am Rand der Triangulation und sind somit ein Artefakt der Methode (vgl. o. Kap. 2.1.3. Abb. 10). Ohne diese Strecken wäre die Übereinstimmung wahrscheinlich noch größer.

Hier liegt zwar scheinbar eine Normalverteilung vor, man kann aber schon rein archäologisch einen professionellen Bergbau ablehnen.

Es gibt einfach zu viele Überschneidungen und zu viele “zu kurze“ Abstände (s. o. 2.1.3. Abb. 2.13). Der Grund für die Verteilung der Triangulationslinienlängen in der Halde liegt im Auftreten der schon erwähnten “Störungen“ des ursprünglichen Musters. Die Triangulation erfasst wie gesagt den letzten Zustand des Schachtfeldes. Dieser ist stark von den nachträglichen Störungen geprägt, bei denen Abstände von 1,65 m bis 1,70 m eine wichtige Rolle spielten (vgl. die entsprechenden Ergebnisse aus 2.1.4.2.). Das führte zu einer Verringerung des Vorkommens von längeren Strecken bei gleichzeitiger Vermehrung von Strecken, die stets nur etwas kleiner als der Durchschnitt (2,02 m) sind.

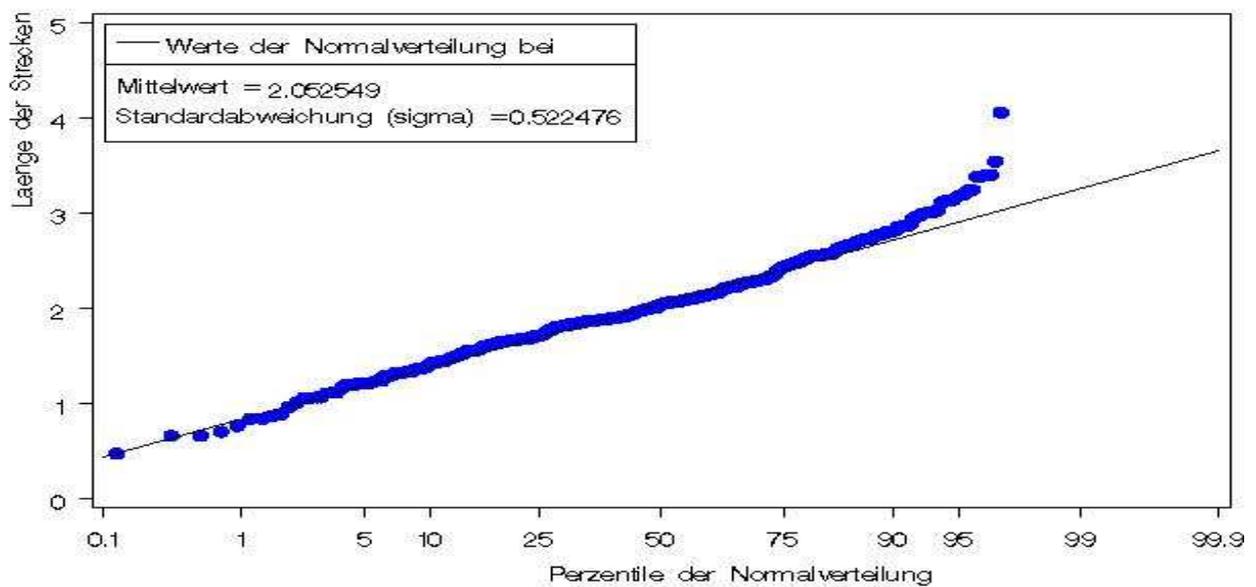


Abb. 2.27: Abensberg-Arnhofen. Graphischer Test auf Normalverteilung für die Streckenlängen aus der Halde. Die blauen Punkte geben an, wieviel Prozent (X-Achse) von Strecken mit einer bestimmten Länge (Y-Achse) im Fall der Halde vorhanden sind. Die schwarze Linie beschreibt diese Beziehung für eine idealisierte Verteilung mit den gleichen Parametern (Mittelwert; Standardabweichung).

Man kann sich dies graphisch vorstellen, wenn man die beiden Histogramme heranzieht (s. o. Abb. 2.25 und 2.26). Würde man bei der Verteilung der Kiesgrube einige längere Strecken deutlich verkürzen und so den Effekt der Platzierung einzelner “Störer“ inmitten einer vorhandenen Schachtverteilung simulieren, dann erschienen diese Strecken im linken Teil des Histogramms bei den Linien, die etwas kürzer sind als der Durchschnitt. Der Verlauf des Kiesgrubenhistogramms wäre dann nicht mehr so linkssteil. Genau dies geschah mit der Schachtverteilung in der Halde.

Ursprünglich lag, wie gesagt, vermutlich auch hier eine Verteilung ähnlich wie in der Kiesgrube vor. Durch häufige Verwendung möglichst kurzer Abstände bei der Anlage späterer Schächte in den zunächst ausgesparten Zwischenräumen wurde die Verteilung "normalisiert". Die Art der Verteilung geht also nicht auf professionellen Bergbau zurück.

In einem kleinen Ausschnitt zeigt der Quantil-Quantil-Test sogar noch, dass ursprünglich eine andere Verteilung vorlag – bevor spätere Schächte das Muster des primären Abbaus störten. So weicht das Perzentil >90% vom erwarteten Verlauf deutlich ab. Hier ist die Verteilung von größeren Abständen geprägt. Sie gehen die auf das ursprüngliche Belegungsmuster zurück und sind daher regelhaft deutlich länger, als dies aufgrund der restlichen, normal verteilten Abstände zu erwarten wäre.

Bei einem nicht gestörten ursprünglichen Abbaumuster wäre eine *Linksteilheit* bei der Abstandsverteilung zu erwarten, wie man sie in der Kiesgrube vorfand. Linksteilheit bedeutet, die Untergrenze ist gegenüber einer Normalverteilung deutlicher ausgeprägt als die Obergrenze. Das ist leicht verständlich, war es doch gefährlicher, einen zu kurzen Abstand zu wählen als einen zu langen. Man achtete deshalb bei kleinen Abständen besonders genau auf die Länge. Die Linksteilheit wurde ebenfalls durch den "normalisierenden" Faktor Störung weitgehend beseitigt. Die bei den späteren Störungen entstandenen Abstände sind dagegen normalverteilt um den jeweils von den Neolithikern als Minimalabstand verwendeten Wert. Und diese Normalverteilung der "Störer" untereinander und zum vorigen Muster überlagert den Bereich der kurzen Abstände aus der ursprünglichen Verteilung so stark, dass bei der Addition der beiden Verteilungen (ursprüngliches Muster plus Verteilung der "Störabstände") die Linksschiefe der ursprünglichen Verteilung aufgehoben wurde.

Ein weiterer Grund kann leicht aus dem Histogramm abgeleitet werden. Wie gesehen besteht das Histogramm aus einer Aneinanderreihung lauter kleiner Gipfel, die ihrerseits stark Normalverteilungen ähneln. Jede einzelne dieser Verteilungen ist Ergebnis eines jeweils angestrebten Regelabstandes. Versuchen Menschen bestimmte Größen einzuhalten, ergeben sich wiederum Normalverteilungen (vgl. IHM 1978, 7 und 89ff.).

Um ganz sicher zu gehen, wurde für die Halde nachträglich nochmals ein rechnerischer Test auf Normalverteilung durchgeführt. Dabei kam wiederum das Programm 'SAS' zur Anwendung. Der Test erfolgte mit Hilfe der Prozedur 'univariate' und den entsprechenden Parametern bei der Option 'histogramm'. Als Wert für die Teststatistik des Kolmogorov-Smirnov-Testes auf Normalität ergab sich 0,0535655, was einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 1 % für eine Normalverteilung entspricht. Der visuelle Eindruck, es liege eine Normalverteilung vor, ist aus statistischer Sicht demnach unhaltbar.

Die Schachtverteilung in der *Kiesgrube* zeigt das ursprüngliche Muster des Abbaus. Liegt vielleicht hier eine Normalverteilung vor, die mit der Annahme eines professionellen Bergbaus vereinbar ist? Obwohl das Muster in der Kiesgrube beinahe keine Störungen aufweist, ergibt sich eine weniger eindeutige und kompliziertere Beziehung zwischen der empirischen und der theoretischen Verteilung (**Abb. 2.28**).

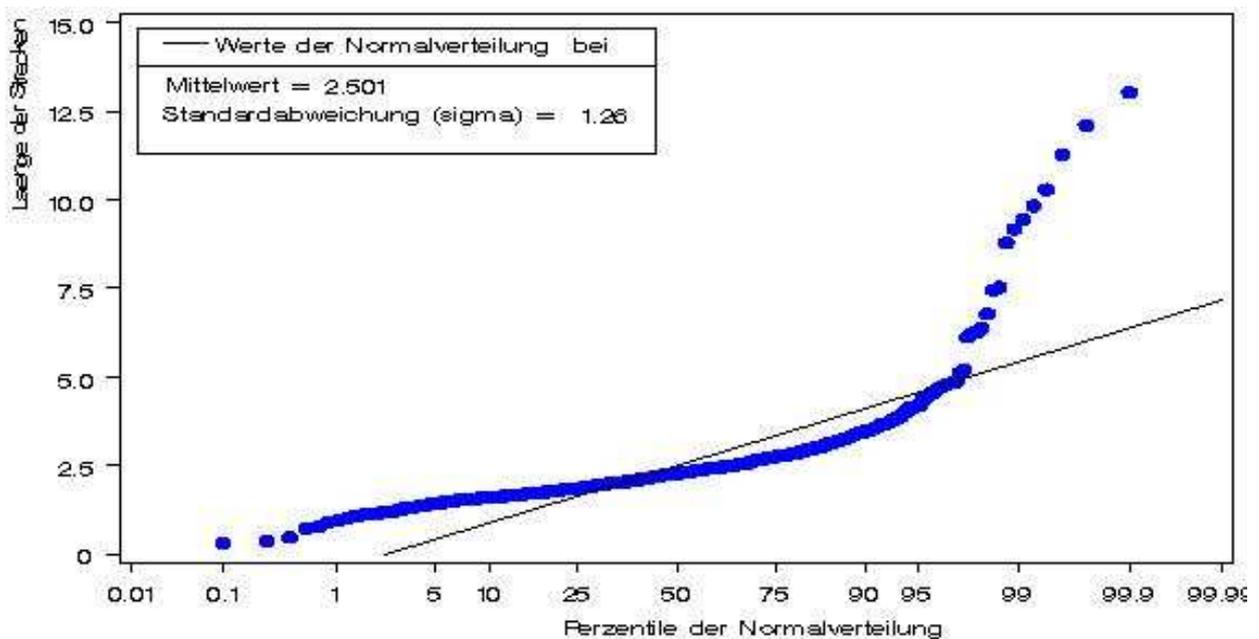


Abb. 2.28: Abensberg-Arnhofen. Graphischer Test auf Normalverteilung für die Streckenlängen aus der Kiesgrube. Die blauen Punkte geben an, wieviel Prozent (X-Achse) von Strecken mit einer bestimmten Länge (Y-Achse) im Fall der Halde vorhanden sind. Die schwarze Linie beschreibt diese Beziehung für eine idealisierte Verteilung mit den gleichen Parametern (Mittelwert; Standardabweichung).

Diese Beziehung passt überhaupt nicht zu einer Normalverteilung. Wird die Steigung der realen Häufigkeiten (blaue Punkte) näher betrachtet, so ist eine kubische (x^3) oder logarithmische Beziehung zwischen empirischen und idealen Werten zu bemerken. Eine Ähnlichkeit zur Haldengrabung liegt nur bei der Besetzung der oberen Häufigkeitsklassen (etwa ab 97 %-Perzentil) durch "zu lange" Strecken vor. Das häufigere Auftreten längerer Strecken ist ganz einfach durch den unregelmäßigen Umriss dieser Untersuchungsfläche sowie durch die Erfassung des Bergwerkssüdrandes bedingt (s. o.). Als Ergebnis ist festzuhalten: Die empirische Verteilung ist keine Normalverteilung. Es zeigt sich also kein Hinweis auf professionellen Bergbau. Man könnte aufgrund des Histogramms noch vermuten, es handele sich doch um die Summe aus mehreren Normalverteilungen.

Nach dem Additionstheorem müsste auch die Summe aus mehreren addierten Normalverteilungen selbst wiederum eine Normalverteilung sein (IHM 1978, 88) – das ist aber nicht der Fall. Die Verteilung ist zwar nicht normal, sie weist aber dennoch eine regelhafte Beziehung zu einer solchen Verteilungsform auf. Die Steigung der realen Häufigkeiten nimmt im linken Bereich zunächst stark zu um dann wieder abzunehmen. Dabei sind die empirischen Häufigkeiten größer als zu erwarten war. In der Nähe des Mittelwerts folgen sie annähernd den zu erwartenden Werten. Um den Mittelwert herum schneiden sie die Linie der theoretischen Häufigkeiten, unterschreiten sie und nehmen dann weniger stark zu als diese. Im Weiteren kehrt sich dieser Trend wieder um und die Kurve liegt erneut über dem idealisierten Verlauf. Würde die reale Kurve beim 97%-Perzentil gekappt, so träte diese Beziehung noch deutlicher hervor. Es drängen sich also gegenüber einer Normalverteilung überproportional zu viele Abstände im Bereich um den Durchschnitt.

Die Ursache dieser merkwürdigen Beziehung liegt in der oben erörterten *Eigenart der Abstandsverteilung* mit ihren bevorzugten Abständen bei Vielfachen eines bestimmten Werts. Die einzelnen Gipfel des Histogramms verhalten sich zueinander proportional. Wenn jeweils Gruppen von Abständen vorhanden sind, die von gleich großen Stufen (0,208 m) getrennt werden, bedeutet dies für das Verhältnis der Abstände Folgendes: Abstände der Länge $x \cdot 0,208$ und Abstände der Länge $y \cdot 0,208$ verhalten sich zueinander proportional im Verhältnis x/y ! Die oben nachgewiesenen Gipfel zwischen 1,76 m und 2,59 m bilden also eine Kette von Abständen, bei denen das Verhältnis der “Kettenglieder“ untereinander proportional ist. Wenn man sich diese Faktoren als eine Art von Variablenfunktionen vorstellt, die jeweils bestimmte Arten von Verteilungen erzeugen, wird klar, warum in der Kiesgrube keine Normalverteilung vorliegt.

In der Kiesgrube fehlen außerdem die kurzen Abstände weitgehend, die erst entstanden, als später zwischen alten Schächten neue angelegt wurden. Es fand also keine “Normalisierung“ der aus bergbau-technischen Sicherheitserwägungen zu erwartenden linkssteilen Verteilung statt. Verallgemeinert ließe sich sagen, die Verteilung der Streckenlängen resultiert aus der Überlagerung mehrerer proportional zueinander einwirkender Variablenfunktionen.

Bei Einflüssen, die proportional zueinander auf ein Phänomen einwirken, ergibt sich für dieses Phänomene eine *logarithmisch-normale Verteilung* (IHM 1978, 96f und Abb. 5-13). Wenn also die Schachtabstände in der Kiesgrube logarithmisch-normal verteilt sind, bedeutet dies, die Inkremente, aus denen ihre Verteilungsfunktion zusammengesetzt ist, wirken proportional aufeinander ein (IHM 1978, 307).

Anders gesagt, wenn man eine logarithmisch-normale Verteilung glaubhaft machen kann, bestätigt dies nochmals die Annahme der gleichmäßig abgestuften Abstände als ureigenstes Element der Verteilung der Schachtabstände bzw. als Grundlage der Planung zukünftiger Schächte.

Auch diese Annahme wurde mit der Software 'SAS' mittels des Quantil-Quantil-Tests überprüft (Abb. 2.29). Dieser Test ergibt eine deutliche Übereinstimmung zwischen den empirischen und zu den erwartenden Häufigkeiten. Nur unterhalb des 1 %-Perzentil und oberhalb des 97 %-Perzentils sind die Streckenlängen nicht in den zu erwartenden Häufigkeiten vorhanden. Im ersten Fall sind sie "zu kurz", im zweiten "zu lang geraten".

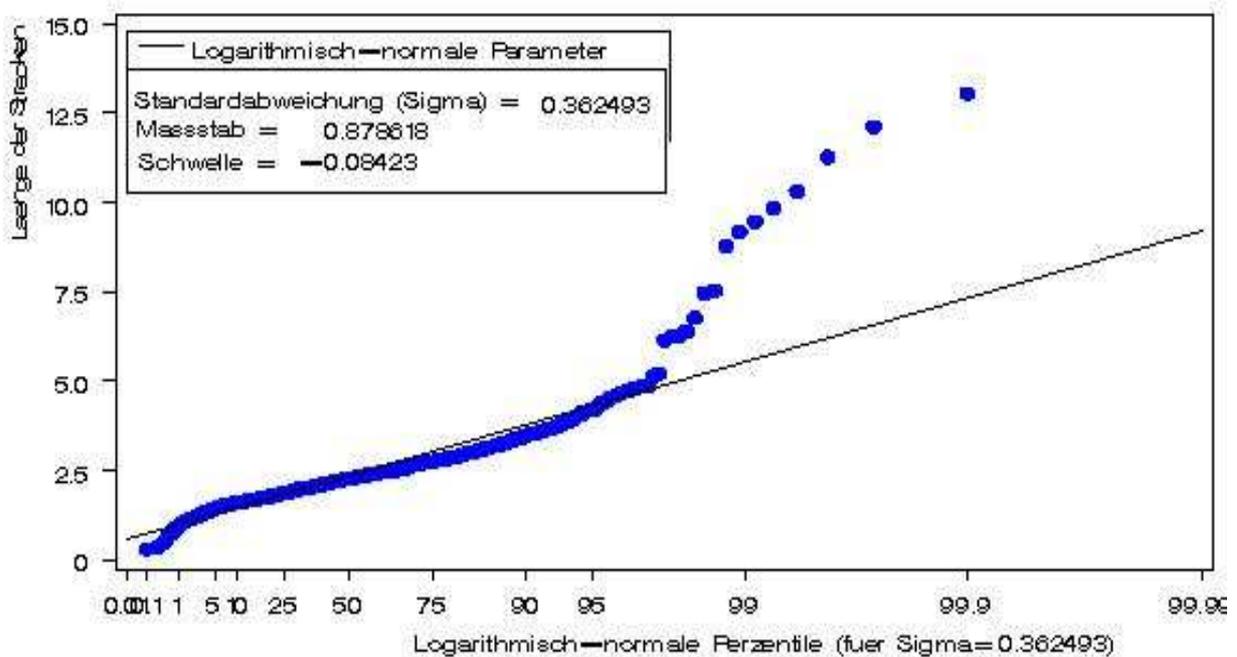


Abb. 2.29: Abensberg-Arnhofen. Graphischer Test auf Logarithmisch-normale Verteilung für die Streckenlängen aus der Kiesgrube. Die blauen Punkte geben an, wieviel Prozent (X-Achse) von Strecken mit einer bestimmten Länge (Y-Achse) im Fall der Halde vorhanden sind. Die schwarze Linie beschreibt diese Beziehung für eine idealisierte Verteilung mit den gleichen Parametern (Standardabweichung, Maßstab und Schwelle).

Die extrem kurzen Strecken rühren von Fehlplatzierungen her. Die Anlage eines weiteren Schachtes mit annähernd derselben Position war ja nicht beabsichtigt, da dort kein bzw. kaum Hornstein zu erwarten war. In diesen Fällen greift die hier postulierte proportionale Einwirkung nicht mehr. Gleiches gilt bei den besonders langen Strecken oberhalb des 97 % Perzentils. Dort bewegen sich die Abstände weit jenseits der größten verwendeten Sicherheits- bzw. Regelabstände, eine logarithmisch-normale Verteilungsfunktion ist dann nicht mehr wirksam.

Betrachtet man den Verlauf im mittleren Bereich zwischen dem 1 %- und dem 95 %-Perzentil genau, so erkennt man, dass hier möglicherweise ein dritter, proportional einwirkender Kausalfaktor vorhanden ist. Der Verlauf der empirischen Häufigkeiten zeigt nämlich immer noch ganz leichte Abweichungen in der Art, wie sie vorher beim Test auf einfache Normalverteilung auftraten (Abnahme und Zunahme der Steigung unterhalb bzw. oberhalb des Mittelwertes).

Dies lässt auf mehrere proportional einwirkende Variablen schließen. Da oben mindestens viermal die Vielfachen eines bestimmten Maßes als bevorzugte Abstände nachgewiesen werden konnten, war nun genau dies zu erwarten. Bei nur zwei proportionalen Faktoren hätte es eine "einfache" logarithmisch-normale Beziehung sein sollen. Bei mindestens vier Faktoren sollte weiterhin zwischen den empirischen und den theoretisch zu erwartenden Quantilen ein Verhältnis in der Art vorliegen, wie es sich beim Test auf Normalverteilung zeigte – und dies ist der Fall.

Die *Verteilungsfunktion der Schachtabstände* in der Kiesgrube, also im Bereich, in dem das ursprüngliche Nutzungsmuster erhalten blieb, ist durch mehrere proportional aufeinander einwirkende Kausalfaktoren geprägt. Vor allem im Bereich oberhalb des 95 %-Perzentils macht sich noch ein weiterer Faktor bemerkbar. Dieser schwache Einflussfaktor bewirkt schließlich ein gegenüber einer logarithmisch-verteilten Variablen ganz leicht erhöhtes Auftreten von größeren Abständen. Sein Einfluss auf die Verteilung ist aber so gering, dass diese weiterhin als logarithmisch-normal bezeichnet werden kann.

Als *Ergebnis der Quantil-Quantil-Tests* wurde deutlich, dass die unterschiedlichen Verteilungen in den beiden Bergwerksbereichen durch die Art und die Kopplung von Faktoren verursacht werden, die der jeweiligen Schachtverteilung kausal zugrundeliegen. Im Fall der Kiesgrube führt die proportionale Beziehung zwischen Gruppen bevorzugter Abstände zu logarithmisch-normal verteilten Streckenlängen. Im Bereich der Haldengrabung wurde ein ursprüngliches Muster durch die Überlagerung mit einem zweiten beinahe bis zur Unkenntlichkeit verwischt.

Festzuhalten bleibt: *sämtliche Analysen der Abstandsverteilungen liefern nur Argumente gegen professionellen Bergbau – nicht dafür.*

Bisher wurde die Schachtverteilung immer als "*Population*" betrachtet, also als Gesamtheit bei der die einzelnen Schächte kaum Beachtung fanden. Kann man nun die Ergebnisse des Abschnittes 2.1.4. so verbinden, dass sich einzelne Bergbauaktivitäten identifizieren lassen? Bieten die Daten aus der Triangulation und der Tesselierung die Möglichkeit, auch auf der Ebene der einzelnen Schächte die Abbauorganisation erkennen zu können? Der modellhaften Umsetzung dieser Problematik ist der folgende Abschnitt gewidmet.

2.1.5. Modelle für die Schachtgruppierung

Nachdem durch den Nachweis von Planung und Vermessung der Zufall als zentraler kausaler Faktor ausgeschlossen werden konnte, gilt es nun zu untersuchen, wie die bisherigen Ergebnisse zu einem Modell der Abbauorganisation zusammengefasst werden können. Im Mittelpunkt steht dabei das Vorhaben, die Schächte zu identifizieren, die zu den einzelnen Bergbauaktivitäten gehören.

Einerseits kann man eindeutig eine über jeden Zweifel erhabene Regelmäßigkeit belegen (s. o. 2.1.4.1.f.), andererseits aber treten bei den Abständen zwischen benachbarten Schächten verschiedene ebenfalls regelhaft bevorzugte Abstandsmaße auf (2.1.4.3.). Die Situation erscheint zunächst widersprüchlich und paradox. Aufgrund der verschiedenen Abstandsmaße müsste sich ja eher eine unregelmäßige Verteilung abzeichnen. Wieso aber zeigen alle geostochastischen Kennwerte das Gegenteil? Dieser scheinbare Widerspruch ist einfach zu lösen. Zugleich weist die Lösung den Weg, welche Ordnungsmuster man im Weiteren suchen muss. Nur wenn immer wieder kleinteilige, in sich regelmäßige Schachtanordnungen vorliegen, kann das vorgefundene rechnerische Resultat zustandekommen. Jede der kleinen Schachtanordnungen muss in sich regelhaft sein, und jede kann dabei andere Abstände bevorzugen. Die einigermaßen regelhafte Aneinanderreihung oder "Addition" dieser Elemente ergibt die geostochastisch beobachtete Regelmäßigkeit. Zu suchen sind also relativ kleine Gruppierungen von Schächten – von diesen muss es aber sehr viele geben. Die Grundlage für das Vorgehen bildet hier die "manuelle" Analyse der Längenverteilung und der Ausrichtung der Triangulationsstrecken sowie die Untersuchung der Richtungen, aus denen die Schächte verfüllt wurden. Im Folgenden wird also versucht, die vorliegenden Daten für die Gruppierung von Schächten zu benutzen.

Das Ergebnis sollte *alle Schächte zeigen, die zu einer Gruppe gehören, welche vom gleichen Bergbauteam im Zuge einer zusammenhängenden Bergbauaktivität angelegt wurden*. Jede dieser Gruppen stünde für eine 'Kampagne' durch eine neolithische Arbeitsgruppe.

Bereits Engelhardt und Binstener erwogen die Möglichkeit, dass benachbarte Schächte im Laufe einer Bergbauaktivität angelegt worden waren (dies. 1988, 13). Sie stützten sich dafür auf die Befundsituation in oberflächennahen Plana. Ein solcher Ansatz erfordert zahlreiche Profile und ist daher im großen Maßstab weniger praktikabel als geographisch-statistische Methoden. Triangulation und Tesselierung kamen für eine solche Fragestellung in der deutschsprachigen Bergwerksarchäologie noch nicht zur Anwendung. Bisher wurde nur das neolithische Bergwerk Krzemionki mit diesen Methoden untersucht (BORKOWSKI 1995, 104ff.).

Die Ergebnisse der Tessellierung bildeten dort die Grundlage für Verbindung zwischen Schachttypen und geologischen Gegebenheiten (BORKOWSKI 1995, 125ff.). Sie wurden nicht zur Ermittlung der Zusammengehörigkeit von einzelnen Schächten genutzt (a. a. O., 148). Stattdessen benutzte man dafür Lage, Gestalt und Orientierung von obertägig erhaltenen Abrauhügeln (vgl. u. 2.1.8.).

In Arnhofen stehen durch die Triangulationslinien und die Thiessenpolygone zwei Arten von Daten zur Verfügung, für die theoretisch die Auswirkungen einer regelhaften Verteilung postuliert werden können.

Dafür ist zunächst zu klären, wie Triangulationslinien und Thiessenpolygone in einem *regelmäßigen Bereich* aussehen sollten. Diese Postulate sind für die archäologische Anwendung zu modifizieren, um sie den tatsächlich vorliegenden Verhältnissen gegenüberstellen zu können. Ein solches Vorgehen wird einem mechanischen Unterteilen der Triangulationsstrecken in Kategorien bestimmter Länge und einer folgenden Zusammenfassung aller Strecken einer Kategorie vorgezogen. Wie schon gezeigt werden konnte (s. o. 2.1.4.2 und 2.1.4.3), treten immer wieder unterschiedliche Regelabstände auf. Der hier gewählte Ansatz ermöglicht es zunächst, Kleinregionen aufzufinden, in denen die gleichen Regelabstände benutzt wurden. Damit kann man spezifische Muster der Nutzung erkennen. Weiterhin ist es möglich, Areale aufzuspüren, in denen diese Kleinregionen aufeinander Bezug nehmen. Auf dieser Basis sind dann Aussagen zur (sozialen) Organisation des Abbaus zu treffen.

Mit den bisher identifizierten Aspekten der Schachtverteilung, ihren kausalen Faktoren und den beachteten Regelabständen, kann eine komplexe Planung belegt werden. Zunächst ist anhand theoretischer Erwägungen zu klären, wie sich die Planung konkret niederschlug. Was passiert beispielsweise, wenn mehrmals hintereinander ein Schacht unter Berücksichtigung der unmittelbaren Nachbarn angelegt wird? Wie wirkt es sich aus, wenn bei jeder Aktivität ein bestimmter Regelabstand verwendet wird? Wie sieht die Triangulation eines solchen Bereiches aus, wie die Tessellierung (**Abb. 2.30**)?

Bei der Antwort muss man sich als erstes überlegen, auf welche Weise sich die Ausweitung des Bergbaus in der Schachtverteilung niederschlägt. Es geht also darum, welche Schachtanordnungen das Ergebnis welcher neolithischen Vorgehensweise sind. Dafür muss hypothetisch entwickelt werden, welche neolithischen Handlungen zu welchem Bild der Schachtanordnung führten.

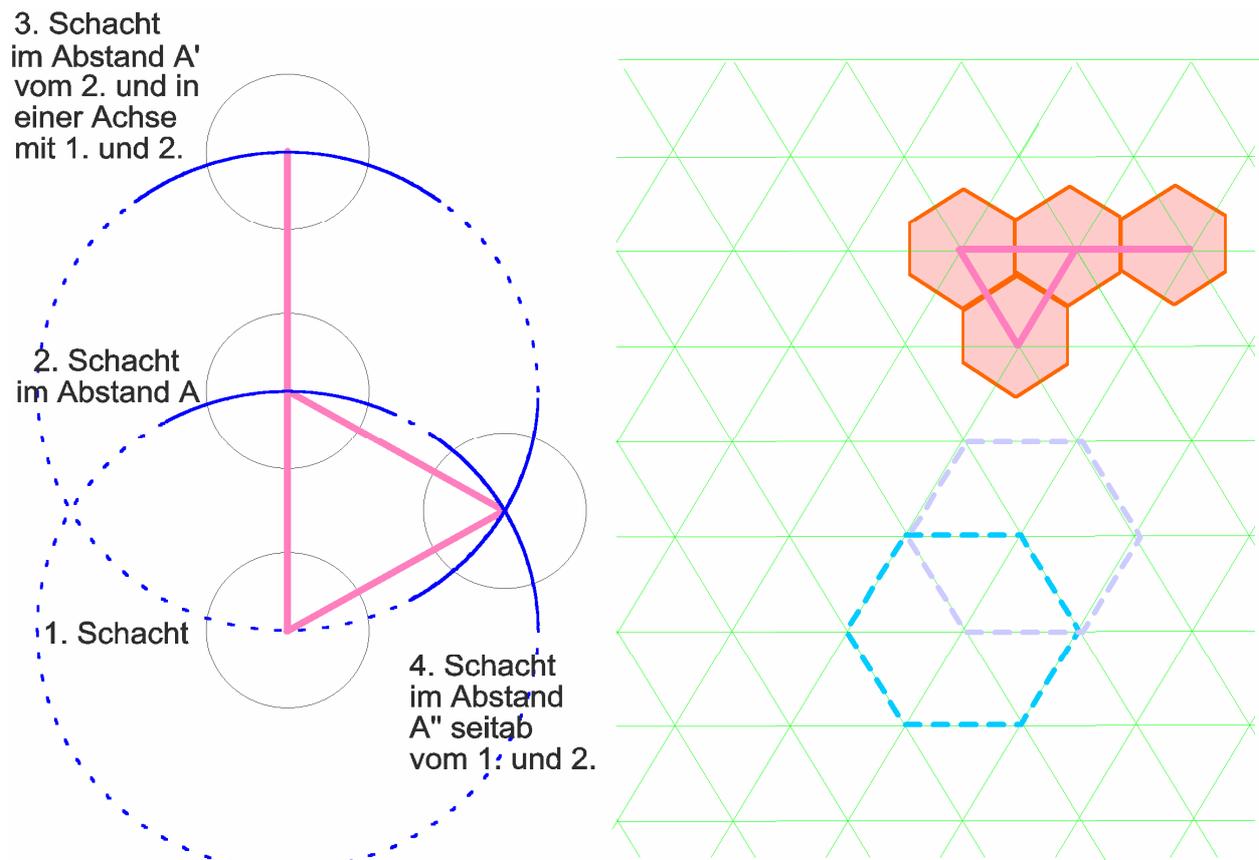


Abb. 2.30: Theoretische Triangulation/Tesselierung regelmäßig angeordneter Schächte.

Links: Bei der Anlage von Schächten in gleichbleibendem Abstand A (blaue Kreise) unter Beachtung der gleichen Achse entsteht zunächst ein lineares Muster, das bei seitlicher Fortführung dieses Konzepts zu einem Muster aus gleichseitigen Dreiecken (rosa Linien) wird.

Rechts: Wird diese Konzeption fortgeführt, verbindet die Triangulation alle Schächte eines solchen Musters zu gleichseitigen Dreiecken. Es entsteht ein netzartiges Gitter (grüne Linien). Sind nur einige Objekte besonders regelhaft angeordnet, entstehen lokal quasi „Bruchstücke“ (rosa Linien) dieses Gitters. Hierbei besitzt jedes Thiessenpolygon (orange Polygone) im Bereich der regelmäßigen Verteilung sechs Seiten von annähernd gleicher Länge. Bei der Fortschreibung einer lokalen Gruppe müssen aber auch die umgebenden anderen Schächte zumindest grob beachtet werden, wenn sich ein insgesamt regelhafter Eindruck einstellen soll. Die gestrichelten blauen Linien verbildlichen das schablonenhafte Vorgehen dabei. Nur wenn alle umgebenden Schächte völlig gleichartig behandelt würden, entstünde ein wabenförmiges Muster aus Hexagonen. Ansonsten weist das Gitter an den „Nahtstellen“ der Gruppen Deformationen auf.

Wenn in einem Bereich stets mit dem *gleichen Abstand* geplant und gearbeitet wird, führt die Triangulation einer solchen Schachtverteilung zu einem netzartigen Gitter aus abwechselnd angeordneten gleichseitigen Dreiecken deren Basislinien sich zu waagrechten parallelen Linien formieren (HODDER/ORTON 1976, 57 Abb. 4.3.a); MAYER 1992, 124). Die Tesselierung einer solchen Verteilung führt zu einer wabenartigen Struktur aus Thiessenpolygonen (BORKOWSKI 1995, 110). Alle Polygone sind dann Hexagone (gleichseitige Sechsecke) mit gleicher Fläche und gleichen Seitenlängen.

Damit man bei der Schachtanlage so vorgehen kann, muss die exakte Lage aller bereits bestehenden Vorgängerschächte ermittelt werden bzw. bekannt sein. Sind die beschriebenen Auswirkungen bei Triangulation und Tesselierung zu beobachten, kann von einem stetig fortgesetzten Abbau durch bestens informierte Personen ausgegangen werden. Denn dabei wäre stets der gleiche Abstand eingehalten worden.

Die Statistiken der Triangulationslinienlängenverteilungen zeigen jedoch (s. o. Kap. 2.1.4.), dass die *Schachtabstände* immer wieder gewisse unterschiedliche (!) Werte einnehmen. Zunächst wurde daher versucht, mit der Kartierung von Strecken annähernd gleicher Länge solche Bereiche zu identifizieren, in denen das gleiche Maß für den Abstand benutzt wurde. Dies erbrachte aber nicht die erhofften Ergebnisse, auch wenn man die Histogrammanalyse zur Kategorienbildung benutzte. Im Gegenteil, gerade die visuell einheitlich erscheinenden Bereiche der Triangulation “zerfielen“ immer wieder in viele Kategorien. Die verwendete GIS-Software ‘MapInfo Professional‘ erlaubt es, die Triangulationslinienlängen in bis zu 16 Kategorien zu kartieren. Grundlage der Kategorienbildung können etwa gleiche Anzahl von Daten pro Kategorie, Bereiche mit Grenzen im gleichen Abstand oder Quantils-Bereiche der zugrundeliegenden Verteilung sein. Die Erwartung, mit einer dieser Klassifizierungen vor allem benachbarte Strecken zusammenfassen zu können, erfüllte sich aber zunächst nicht.

Explorativ wurden daraufhin die Streckenlängen in einigen regelmäßigen Bereichen per Hand überprüft, was zu einem überraschenden Ergebnis führte. Es zeigte sich, dass die Streckenlängen kleinräumig auf eine besondere Art und Weise variieren. Deshalb wurde vom weiteren Zusammenfassen auf statistischer Grundlage abgesehen und – quasi “per Hand“ – ein genauer Vergleich der Länge jeder einzelnen Strecke mit ihren direkten Nachbarn durchgeführt.

Es ließen sich folgende *Auffälligkeiten der Triangulation* beobachten. Es treten immer wieder mehrere fast gleich lange, direkt benachbarte Strecken zusammen auf. Sie stoßen ihrerseits alle an Strecken von unterschiedlicher Länge. Ein Vergleich mit den Untersuchungen von Borkowski in Krzemionki unterstreicht die Bedeutung dieses Befundes (1995, 110). In Krzemionki differierten die Längen aneinanderstoßender Strecken häufig um mehr als 50 %. In Arnhofen ähneln sich die Längen dagegen teilweise bis auf den Zentimeter. Häufig besitzen die annähernd gleich langen Strecken zudem noch eine auffällige Anordnung. Diese tritt vor allem in zwei Varianten auf:

- zwei oder mehr Triangulationslinien in einer Achse mit nur wenigen Grad Abweichung zwischen den Ausrichtungen der einzelnen Strecken;
- drei oder mehr Triangulationslinien als Komplex aus gleichseitigen Dreiecken und zusätzlich Linien von annähernd gleicher Länge.

Als konkretes Beispiel für diese Situation ist ein Ausschnitt aus dem westlichen Teil der Kiesgrube abgebildet (Abb. 2.31). Das Auftreten von annähernd gleich langen Triangulationslinien, die ihrerseits wieder an unterschiedlich lange Linien grenzen, entspricht den oben formulierten Erwartungen. Man hat damit sehr regelmäßige Kleinstregionen vor sich. In jedem dieser Ausschnitte wurde ein kaum variierender Regelabstand umgesetzt. Diese Kleinstregionen sind von Bereichen umgeben, in denen andere Abstände auftreten. Manchmal sind in der Umgebung noch ähnliche Schachtabstände und Winkel zwischen den Triangulationslinien vorhanden, manchmal sind deutlich Brüche im Muster zu erkennen.

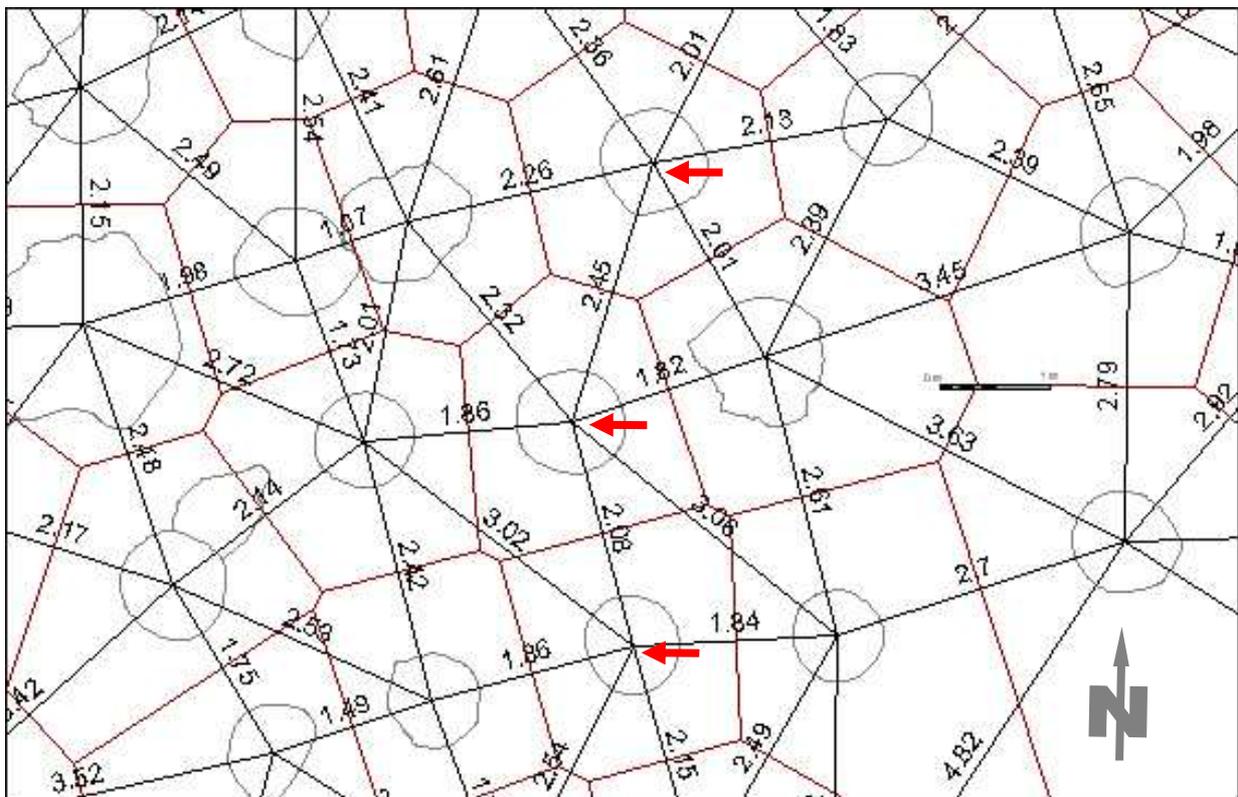


Abb. 2.31: Ausschnitt aus der Untersuchungsfläche in der Kiesgrube mit Befundumrissen (grau), Thiessenpolygonen (rotbraun) und Triangulationslinien (schwarz). Die Triangulationslinien sind mit ihrer Länge in Metern beschriftet. Die roten Pfeile markieren Schächte, bei denen links und rechts weitere in annähernd gleichem Abstand und ungefähr gleicher Achsenrichtung liegen.

Damit sind die zwei Phänomene verschiedener Größenordnungen identifiziert, die bei Planung und *Organisation des Abbaus* eine Rolle spielten: Es gibt sehr regelmäßige Kleinstregionen und annähernd regelmäßige Anordnungen mehrerer solcher Kleinstregionen im Rahmen einer größeren Fläche.

Zunächst ist eine Arbeitshypothese zu entwickeln, die das Zustandekommen und die Bedeutung der *Kleinstregionen* erklärt.

Diese Hypothese besagt: Aneinanderstoßende Triangulationslinien mit gleicher Länge belegen, dass bei allen so verbundenen Schächten dieselbe Menschengruppe aktiv war. Die Begründung dafür ist aus der bergmännischen Erfahrung der Neolithiker bzw. gleichartiger genutzter Abbau-technik abzuleiten (vgl. u. 2.2. zur Schachtmundverbauung). Unter gleichen geologischen und technischen Bedingungen wurde ein einmal erfolgreich eingesetzter Regelabstand immer wieder verwendet. Während einer Abbauaktivität kam deshalb bei jeder Schachtneuanlage das gleiche Abstandsmaß zur Anwendung. Wurde die Abbauaktivität beendet und später in unmittelbarer Nachbarschaft erneut aufgenommen, benutzte man leicht abweichende Regelabstände. Die Abstände zwischen den neuen Schächten und den Vorgängerschächten war davon abhängig, dass man diese genau lokalisierte. Zwischen alt und neu konnten sich also größere Schwankungen beim Abstand ergeben. Gleiches gilt für die Ausrichtung einer Schachtreihe. Dies erklärt die Schwankungen bei Länge und Ausrichtung der Triangulationslinien zwischen den regelmäßigen Kleinregionen und ihrer unmittelbaren Umgebung.

Zusammengefasst lautet die Hypothese:

- *zusammengehörende Schächte sind durch aneinanderstoßende Triangulationslinien mit gleicher Länge verbunden; alle Schächte einer derartigen Kleinstregion mit regelmäßigen Abständen sind als Ergebnis der ununterbrochenen Aktivität durch dieselbe Menschengruppe anzusehen. Im Folgenden werden solche Regionen als Schachtgruppe bezeichnet.*

Da jede Realisierung einer Planung in der Praxis gewissen Unschärfen unterworfen ist (vgl. IHM 1978, 305 ff), kann man unterstellen, dass dies auch beim neolithischen Bergbau der Fall war. Das Abmessen der Abstände und der Ausrichtungen führte jedesmal zu leicht variierenden Werten, die sich um Nuancen vom Geplanten unterschieden. Bereits ein planmäßiges neolithisches Vorgehen weist also keine hundertprozentig exakten Abstände und Winkel auf. Kleinstregionen mit Maßen die bis auf wenige Zentimeter und Grad genau sind, sind nach dem hier und weiter oben erörterten Aspekten (vgl. o. 2.1.4.2.) als gut erfasste Planungsumsetzung zu betrachten.

Die Umsetzung des jeweiligen Regelabstandes wirkt sich nur bei der *gleichzeitigen, gemeinsamen Planung* der Lage mehrerer Schächte aus. Dabei konnte eine Arbeitsgruppe von vornherein nach ihren Vorstellungen arbeiten. Nur wenn im gleichen Arbeitsschritt jeweils mehr als zwei Schachtpositionen festgelegt wurden, lässt sich also überhaupt ein gleiches Abstandsmaß beobachten. Am deutlichsten dürfte sich dies auswirken, wenn die zukünftigen Schachtpositionen vor Beginn einer Abbauaktivität festgelegt wurden. Bei einer sukzessiven Umsetzung besteht grundsätzlich die Chance, dass sich nachträglich weitere Fehler einschleichen. Sind regelhafte Kleingruppen zu beobachten, spricht dies dafür, dass die Lage aller neuen Schächte auf einmal eingemessen und damit ihre Position zu allen Schächten, alten und neuen, festgelegt wurde.

Fehler beim *Erkennen aufgelassener Schächte* führten dazu, dass es zwischen den untereinander regelhaft angeordneten Schächten einer Gruppe und ihren Nachbarn zu Abstandsunterschreitungen und sogar zu Überschneidungen kam. Gerade diese beiden Phänomene treten trotz der großen Regelmäßigkeit immer wieder im Randbereich der regelmäßigen Kleinstregionen auf. Schächte, die im Laufe einer Bergbauaktivität angelegt wurden, werden dadurch im Nachhinein als Ensembles kenntlich, die sich durch ihre besondere Einheitlichkeit in Bezug auf Abstand und Anordnung von der Umgebung abheben. Wurde der Bergbau unterbrochen und später wieder aufgenommen, konnten sich kleinere Ungenauigkeiten bei der Platzierung der neuen Gruppe ergeben. Die zuvor beendete Aktivität wurde dadurch zu einer abgeschlossenen, einheitlichen Kleinstregion. Sie setzte sich nun von allen umgebenden Bereichen ab, auch von solchen, wo der gleiche Bergbautrupp aktiv wurde. Genau diese Situation tritt beim Vergleich der Abstände und Ausrichtungen immer wieder auf. Dies erklärt sowohl das unterschiedliche Maß an Regelmäßigkeit zwischen größeren Bereichen und Kleinstregionen als auch die Brüche im erkennbaren Muster.

Da zum Erkennen von *Ähnlichkeit* mindestens zwei Objekte nötig sind, braucht man zur Identifizierung von Schachtgruppen mindestens zwei ungefähr gleich lange Triangulationslinien. Der Mindestumfang einer Gruppe, die man auf diese Weise erkennen kann, beträgt daher drei Schächte.

Damit ist noch nicht festgelegt, welche *geometrische Gestalt* bzw. welchen Umriss eine solche Gruppe besitzt (**Abb. 2.32**). Die Analyse der Schachtverteilung ergab (s. o. 2.1.4.), dass man bei der Planung spätere Abbauaktivitäten auf den noch ungenutzten, unmittelbar benachbarten Flächen in das Vorgehen mit einbezog. Es kommen also nur Schachtanordnungen in Frage, die zu einem geringen Flächenverbrauch führen. Bei der Anordnung von drei Schächten bieten sich zwei geometrische Figuren an: Die Anordnung in Linie entlang einer Achse oder die Anordnung über Eck in Form eines gleichseitigen Dreiecks. Bei größeren Aktivitäten entstehen Kombinationen aus diesen Elementen. Wenn andere Anordnungen umgesetzt worden wären, hätte dies bei späteren Abbauaktivitäten an der Grenze zu den Vorgängeraktivitäten zu Flächenverlusten geführt. Denn wenn die Vorgängerschächte unregelmäßig verteilt sind, ergibt die Verwendung des Regelabstandes zu einem der Vorgängerschächte gleichzeitig einen unnötig großen Abstand zu einem anderen. Dieser Effekt war den neolithischen Bergleuten sicher bekannt. Die geostatistisch belegte Regelmäßigkeit legt nahe, dass man beim Planen versuchte, solche Probleme zu vermeiden.

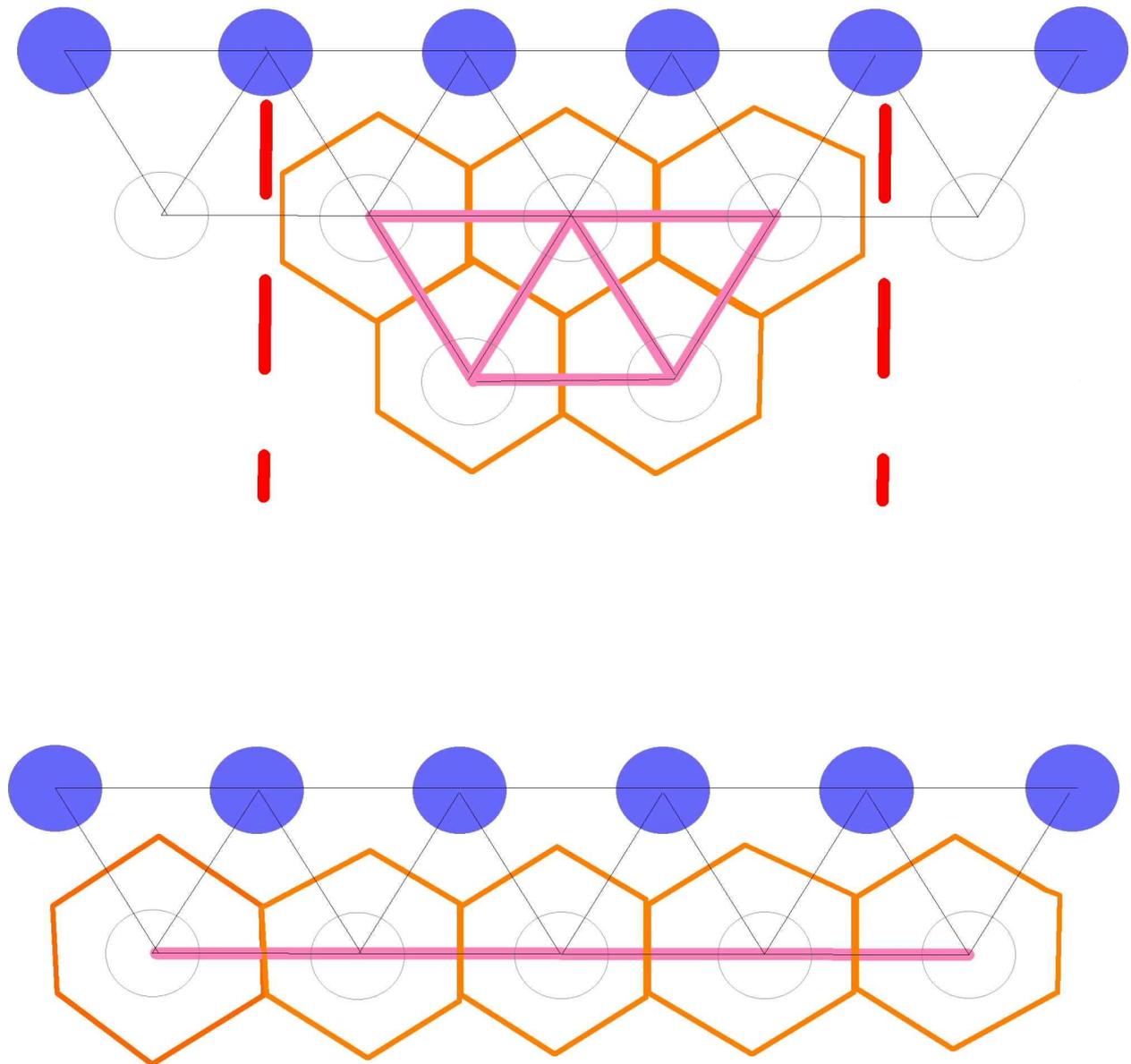


Abb. 2.32: Hypothetisch mögliche Anordnungsmuster von Schächten in gleich bleibendem Abstand. Dargestellt sind jeweils hypothetische Varianten mit alten (blaue gefüllte Kreise) und neuen Schächten (graue ungefüllte Kreise), sowie den sie verbindenden Triangulationslinien (schwarze Linien). Die im gleichen Abstand angelegten Schächte sind mit rosa Linien hervorgehoben und die zugehörigen Thiessenpolygone mit einem orangen Rand.

Oben: Dreieckige bzw. "polygone" Gruppe entstehen, wenn nicht genug Platz vorhanden ist, um alle Schächte in einer Reihe anzulegen. Die dafür verantwortlichen Grenzen sind mit roten, gestrichelten Linien markiert.

Unten: Längere lineare Gruppe weisen das Fehlen von Platzbegrenzungen hin, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufen.

Ein weiteres Argument für die Anwendung linearer oder dreieckiger Anordnungsmuster liefern organisations- und bergbautechnische Überlegungen (vgl. BORKOWSKI 1995, 101f):

- *um bisherige Kenntnisse weiter zu nutzen und größere Unwägbarkeiten auszuschließen, wurden die neuen Schächte, die in den unberührten Bereichen jenseits der bisherigen Abbaufont angelegt wurden, so nah entlang der bisherigen Abbaufont platziert, wie es sinnvoll erschien (Regelabstand bzw. Mindestabstand).*

Bei einem Bergbau, der sich an solchen Vorgaben orientiert, laufen die Verbindungslinien zwischen den neuen Schächten parallel zur Verbindungslinie zwischen den alten Schächten bzw. zum obertägig erkennbaren Verlauf der Abbaufont. Die Triangulationslinien sind in diesem Fall alle in einer Achse angeordnet.

In einigen Fällen treten *Besonderheiten* auf. So gibt es Kleinstregionen mit großem internen Regelabstand, die zugleich deutlich geringere Abstände zu den benachbarten Gruppen besitzen. Sie lassen sich gut mit folgendem Bezug zur Abbaufont erklären. Konnte von den Neolithikern nur noch die Grenze des Abbaus, nicht aber die genaue Lage der einzelnen Schächte ermittelt werden, kamen die neuen Schächte in einer Reihe zu liegen, die zwar parallel zur alten Abbaufont lag, aber gegen die Reihe der aufgelassenen Schächte mehr oder weniger stark verschoben war. Auf diese Weise entstanden annähernd parallele Schachtreihen, deren Abstände zueinander einmal größer und einmal kleiner ausfielen. Je besser die Lokalisierung der toten Männer (aufgelassene Schächte) gelang, desto größer ist die Ähnlichkeit der Abstände zwischen den alten und den neuen Schächten.

Bei dem oben beschriebenen Vorgehen entstanden *lineare Anordnungen* von Schächten. Denn die Bergwerksgrenze verschiebt sich jeweils nur um eine "Zeile" von Schächten nach außen. In dieser Zeile legte man so viele Schächte an, wie man für nötig hielt. In der Siedlungsgeographie werden Objekte, die in Reihen hintereinander liegen, als lineare Anordnung bezeichnet (LIENAU 1986, 85). Derartige Schachtanordnungen werden deshalb hier als *lineare Gruppen* bezeichnet (**Abb. 2.32 unten**).

Wenn aber in dem gerade genutzten Sektor des Bergwerks der Platz links und rechts zur Ausbreitungsrichtung limitiert war, weil hier die Ansprüche anderer Gruppen zu beachten waren bzw. bereits andere Gruppen tätig waren, ergibt sich eine andere Situation. Während einer Aktivität verlegte man den Abbau unter Umständen gleich um mehrere neue Schachtzeilen nach außen. Diese Zeilen verliefen wiederum alle parallel zur ersten neuen Zeile liegen. Das Anlegen neuer Zeilen wiederholte man solange, bis die beabsichtigte Schachtzahl in dem zur Verfügung stehenden Raum untergebracht wurde.

Damit entstehen Anordnungen, die bei einer Triangulation mehrere *gleichseitige Dreiecke* umfassen (**Abb. 2.32 oben**). In Anlehnung an die dabei entstehende Thiessenpolygonanordnung werden sie hier als *polygone Gruppe* bezeichnet. Sobald eine solche Gruppe mehr als drei Schächte umfasst, besitzt sie auch eine erkennbare Längsachse.

Die Vorverlegung der Abbaufont um mehr als eine "Schachtzeile" während einer Abbauaktivität ist allerdings kein eindeutiges Anzeichen für eine Begrenzung der nutzbaren Fläche. Als Ursache für die Entstehung einer polygonen Gruppe sind auch bestimmte bergbautechnische Erkenntnisse denkbar. Beispielsweise könnte die zum Bergwerksrand gerichtete Weitung eines Schachtes einen besonders ergiebigen Flözabschnitt angetroffen haben.

Festzuhalten ist:

- *rational angelegte Schachtgruppen können in zwei Varianten auftreten: als lineare und als polygone Gruppen. Bei einer linearen Gruppe sind die Schächte entlang einer Achse angeordnet und die sie verbindenden Triangulationslinien liegen in etwa in einer Linie. Eine polygone Gruppe besteht dagegen aus gleichseitigen Dreiecken und weiteren Linien.*

Einschränkend ist zu bemerken, dass es sich bei der polygonen Variante auch einfach um mehrere lineare Gruppen handeln könnte, die jeweils wegen optimaler Kenntnis der Lage aller toten Männer und präziser Vermessung nur den Eindruck eines über mehrere "Zeilen" hinweg fortgeführten Abbaus vermitteln. In diesem Fall würde eine polygone Gruppe mehrere Aktivitäten derselben Menschengruppe widerspiegeln.

Prinzipiell sind auch Schachtanordnungen denkbar, bei denen nur die Triangulationslinien annähernd gleich lang sind, ihre Ausrichtungen aber stark differieren. Da solche Phänomene aber die Fortführung des Abbaus bei der nächsten Aktivität behindern, sind sie aufgrund der bisherigen Ergebnisse unwahrscheinlich.

Neben den sehr regelmäßigen Kleinstregionen gibt es ein Ordnungsphänomen übergeordneter Größenordnung, nämlich die annähernd regelmäßige *Anordnung mehrerer Kleinstregionen*. Auch diese geht auf die Abbauorganisation zurück. Kehrt dieselbe Gruppe von Bergleuten zu einem anderen Zeitpunkt wieder zurück und führt ihren Abbau fort, so dürfte ein ungefähr gleiches Abstandsmaß verwendet worden sein. Da man auch noch gut Bescheid wusste, wo die "eigenen" alten Schächte lagen, entsprachen auch die Abstände zwischen alten und neuen Schächten annähernd dem bevorzugten Abstandsmaß. Wenn die benachbarten Vorgänger- oder Nachfolgebauten von einer anderen Gruppe angelegt worden waren, konnten dort andere Regelabstände zur Anwendung gekommen sein. Ähneln sich also zwischen benachbarten Schachtgruppen die Maße innerhalb und zwischen den Komplexen, kann dies mit Aktivitäten derselben Gruppe zusammenhängen.

Diese Ähnlichkeit alleine ist noch keine hinreichende Begründung, derartige Gruppen zu größeren Komplexen zusammenzufassen. Immerhin zeigt die Statistik, dass grundsätzlich bestimmte Abstände angestrebt wurden. Auch verschiedene Gruppen von Bergleuten könnten annähernd dasselbe Abstandsmaß verwendet haben. Mit diesem Befund ist also noch kein eindeutiger Zusammenhang zu begründen.

Erst wenn zwischen *Gruppen ein Bezug* besteht, wird eine Verbindung wahrscheinlich. Die betreffenden Schachtgruppen sollten vor allem mit ihren Längsachsen annähernd parallel zueinander liegen. Daran ist erkennbar, dass man die Lage der alten Abbaufont genau kannte. Archäologisch ist diese Situation daran zu erkennen, dass die Schächte an den Enden einer Gruppe jeweils maximal um einen halben Schachtabstand gegeneinander verschoben sind. Auf die Dauer führt das dazu, dass alle Schachtgruppen in einem Bereich annähernd die gleiche Flucht aufweisen.

Wie sieht das *Muster der Triangulationslinien* in einem solchen Fall aus? Bei der Triangulation entstehen dann in etwa gleichseitige Dreiecke zwischen den Schächten der alten und der neuen Gruppe(-n). Bei mehreren Gruppen ergibt sich ein übergeordnetes Muster, das der Idealverteilung ähnelt: Ein Sechseck aus sechs annähernd gleich langen Triangulationslinien (s. o. **Abb. 2.30 rechts: gestrichelte blaue Linien**). Ein solches Metamuster zeigt sich als wiederkehrendes Schema, das maskenartig über die regelmäßigen Teile der Schachtanordnung verschoben werden kann. Es entsteht graphisch aus der "Addition" von sechs benachbarten gleichseitigen Dreiecken mit jeweils entgegengesetzten Basislinien, wenn die Dreiecke in zwei Reihen angeordnet. Das bedeutet, dass alle Schächte in diesem Areal annähernd optimal bei der Planung einbezogen wurden. Da sich dieses Muster erst bei der Einheitlichkeit von mindestens drei "Schachtzeilen" zeigt, müssen für seine Auffindung mindestens zwei polygone oder drei lineare Gruppen vorhanden sein. Wenn das Muster über weitere Zeilen hinweg verschoben werden kann, erhöht sich die Mindestzahl der zusammengehörenden Schachtgruppen mit jeder Verschiebung um eins. Um festzustellen, ob ein solches Sechseck aus Triangulationslinien vorliegt, sind allerdings gleich sechs Streckenlängen zu überprüfen.

Diese Ordnungsstruktur kann mit den *Thiessenpolygonen* einfacher untersucht werden. Im Fall der Bekanntheit aller Vorgängerschächte entsteht eine Verteilung, die einer optimalen Raumnutzung sehr nahe kommt. Die Tessellierung einer derartigen Verteilung führt zu sechsseitigen Thiessenpolygonen mit annähernd gleich langen Seiten, weil jeder Schacht wegen der optimierten Raumnutzung sechs direkte Nachbarn in gleichen und/oder ähnlichen Abständen besäße (s. o. **Abb. 2.30 rechts: orange Polygone**).

Treten also Sechsecke aus ungefähr gleich langen Triangulationslinien auf, so besitzt das Thiessenpolygon des Schachtes in der Mitte dieses Musters automatisch die Form eines gleichseitigen Hexagons. Mehrere benachbarte Thiessenpolygone mit dieser Form entstehen erst bei fortgesetzter optimierter Einplanung aller umgebenden Schächte. Anhand solcher Polygone lassen sich regelmäßige Areale leichter ausfindig machen, als wenn man Sechsecke aus annähernd gleich langen Triangulationslinien sucht.

Die Identifizierung von Arealen mit *zusammengehörenden Schachtgruppen* ist demnach beim Zusammentreffen mehrerer Eigenschaften der in Frage stehenden Schachtgruppen möglich:

- *ein Bezug in der Ausrichtung zeigt sich in annähernd parallelen Achsen von zwei benachbarten Schachtgruppen;*
- *der bei zwei benachbarten Gruppen verwendete Regelabstand ähnelt sich;*
- *ein Bezug von mehr als zwei Schachtgruppen manifestiert sich durch Anordnung in einer Reihe "hintereinander", wobei die Enden der Gruppen um etwa einen halben Schachtabstand gegeneinander verschoben sein können;*
- *im Zentrum einer solchen Anordnung treten (mehrere zusammenhängende) Thiessenpolygone mit hexagonalem Umriss auf.*

In einem solchen Areal war mit hoher Wahrscheinlichkeit ein- und dieselbe neolithische Gruppe mehrmals mittelbar hintereinander aktiv bzw. es bestand eine fortgesetzte Abbautradition.

Bei der ersten Eigenschaft ist noch eine andere Variante denkbar. Ein Zusammenhang kann nur dann festgestellt werden, wenn die betreffenden Schachtgruppen zu einer Abbaufont gehörten, die entlang einer Linie nach außen vorgeschoben wurde. Es ist aber grundsätzlich auch denkbar, dass eine Abbaufont einen Schwenk um einen Punkt vollführte bzw. entlang einer gebogenen Linie nach außen vorverlegt wurde. Dann wären die einzelnen Gruppenachsen wie Speichen eines Rades bzw. wie Rotorblätter einer Turbine angeordnet. Solch Anordnungen besitzen allerdings nur sehr wenige empirisch überprüfbare Eigenschaften. Mit dem hier vorgestellten Vorgehen lassen sie sich nicht aufspüren.

Die regelmäßige aufeinander bezogene Anordnung von *langgestreckten Schachtgruppen* ähnelt der von Parzellen in einer Flur. In der Siedlungsgeographie werden solche Anordnungen als Verband bezeichnet (LIENAU 1986, 96; NIEMEIER 1967, 53f.). Eine aufeinander bezogene Anordnung aus mehreren, sehr regelmäßigen Kleinstregionen (Schachtgruppen) wird deshalb als *Schachtverband*, *Traditionsbereich* oder *Traditionsfläche* bezeichnet. Voraussetzung für diese Bezeichnung ist, dass alle oben geforderten Eigenschaften erfüllt sind.

An diesem Punkt ist noch einmal auf die theoretischen Überlegungen zu den *Lokalisierungsstrategien* einzugehen (vgl. o. 2.1.4.1.). Die Schachtgruppen sind als Anzeichen einer relativ einfachen Strategievariante anzusehen, denn dabei wurde vor allem die direkte Umgebung der neuen Schächte in die Planung einbezogen. Die Existenz vieler aneinander grenzender Schachtgruppen – wie sie im Folgenden noch gezeigt werden wird (s. u. 2.1.6.) – entspricht der vielfachen Wiederholung eines solchen Vorgehens. Die Planungsstrategie beim Arnhofener Bergbau basierte vor allem auf solchen Schritten. Hinter den Bergbauaktivitäten stand demnach keine soziale Struktur, die stärkere hierarchische Züge trug. Allerdings wird auch noch dargestellt werden (ebd.), wie diese Abbauschritte in ein schwach ausgeprägtes, übergeordnetes Muster aus Schachtverbänden eingebettet sind. Die Verbände strukturieren die Lage der Schachtgruppen eher, als dass sie dominieren. Das spricht für eine gewisse Abstimmung zwischen den beteiligten Gruppen. Eine derartige Koordination ist aber grundsätzlich zu erwarten, wenn mehrere Gruppen auf engem Raum aktiv waren. Die Alternative wäre ein rücksichtsloses Vorgehen, das stärkere Zufallseinflüsse zeigen sollte. Die beteiligten Gruppen waren also weder völlig autonom noch völlig autark, sie regelten die Bergwerksnutzung bis zu einem Grad, der ihnen jeweils gewisse Spielräume ließ.

Die bis hier entwickelten Modellüberlegungen bedürfen jetzt noch *Anwendungsregeln*, damit man mit ihnen Schachtgruppen anhand der postulierten Merkmale auf dem Plan auffinden kann. Diese Umsetzung, auch Operationalisierung genannt, hat allen Einflüssen Rechnung zu tragen, die sich auf das Zustandekommen der gesuchten Merkmale auswirken können. Das betrifft vor allem die Ungenauigkeiten der Untersuchungsmethoden. Beobachtete Muster besitzen deshalb gegenüber den hypothetisch postulierten einen gewissen Spielraum. Daher sind die Margen zu spezifizieren, bei denen man das beobachtete Muster noch als Realisation des hypothetischen akzeptiert.

Die zugrunde gelegten Fehlergrößen ergeben sich aus folgenden Überlegungen. Bereits die neolithischen Aktivitäten konnten von kleineren Ungenauigkeiten und Meßfehlern beim Festlegen der Abstände betroffen sein. Sie führten dazu, dass der angestrebte Abstand nicht exakt eingehalten wurde. Besonders die genaue Lokalisierung älterer Schächte ist hier zu nennen. Es traten sicher hin und wieder auch einfache Meßfehler auf. Daneben können zudem einzelne Arbeitsschritte der modernen Untersuchung mit kleinen Fehlern behaftet sein. Zu nennen ist hier besonders das Problem bei der Bestimmung der Schachtmittelpunkte (s. o. 2.1.4.2.). Als Gründe kommen auch Effekte in Frage, die beim archäologischen Ausgrabungen nicht zu vermeiden sind.

Beispielsweise ist im Einzelfall die Identifizierung einer Befundgrenze etwas schwierig. Beim “Anreißen“ des Befundumrisses mit der Kelle könne auch kleinere Abweichungen von ein oder zwei Zentimeter entstehen (geschätzt max. 3 cm). Selbst die Positionierung des Tachymeterreflektors birgt eine ähnlich große bzw. kleine Fehlerquelle. Und auch die tachymetrische Planzeichnung gibt nicht den realen Umriss eines Befundes an. Abhängig von der Anzahl der genommenen Messpunkte wird der Befundumriss zwischen den eingemessenen Punkten des Objekts vom Zeichenprogramm ja nur mehr oder weniger realitätsgetreu interpoliert, was zu einem Befundumriss führt, der wiederum Abweichungen zum untersuchten Befund aufweisen kann. Da dieser Effekt Eingang in die Festlegung der Triangulationskoordinaten findet (s. o. 2.1.3. Abb. 2.10), hat auch er einen Einfluss auf das Untersuchungsergebnis. Die größte Fehlerquelle aber stellt wie schon mehrmals erwähnt die Festlegung der Triangulationskoordinaten selbst dar. Nach den Erkenntnissen der Punktfeldstatistik bewegte er sich bei bis zu ca. 0,06 m (s. o. 2.1.4.2.). Alle diese Fehler können sich aufaddieren. Im (unwahrscheinlichen) Einzelfall können also beträchtliche Unsicherheiten auftreten. Eine stetige, sich gegenseitig verstärkende Aufsummierung von Fehlern über mehrere Einzelobjekte (Triangulationslinien oder Thiessenpolygone) hinweg ist wegen des Zufallscharakters all dieser Phänomene allerdings hochgradig unwahrscheinlich. Die für Fehler anfälligsten Phänomene – neolithische Schachtlokalisierung und Messungen einerseits, Festlegung der Triangulationskoordinaten andererseits – stellen keine voneinander abhängigen Variablen dar. Vereinzelt ist das Zustandekommen unscharf abgebildeter Verteilungsausschnitte zwar möglich. Da aber alle Datenpunkte von den gleichen Effekten betroffen sind, dürften sich ihre Auswirkungen tendenziell eher gegenseitig aufheben. Die hier erzielten Ergebnisse sind trotz der aufgezählten Fehlerquellen als gute Abbildung der historischen Realität anzusehen – sie haben allerdings Einfluss auf die Identifizierung gleich großer Schachtabstände. Da bei mehreren dieser möglichen Fehler wahrnehmungsabhängige Phänomene (neolithische Schachtlokalisierung, neolithische Meßfehler, moderne Befunderkennung, “Anreißen“, Reflektorpositionierung und v.a. Koordinatenfestlegung) vorliegen, sind die erzeugten bzw. “übersehenen“ Fehler relativ in Bezug zu den davon betroffenen Größen (IHM 1978, 305 ff.). Deshalb wird beim Vergleich der Triangulationslinien ein Fehler berücksichtigt, der relativ zur Größe der beteiligten Linien ist: *Aneinandergrenzende Triangulationslinien gelten als gleich lang, wenn sich ihre Länge um maximal 10 %, bezogen auf die jeweils längere der beiden, voneinander unterscheidet.*

Neben der Länge hängt natürlich auch die Ausrichtung der einzelnen Triangulationslinien von der Festlegung der triangulierten Mittelpunktskordinaten der jeweiligen Schächte ab.

Deshalb kann zudem der Winkel zwischen zwei zusammen stoßenden Linien von Fehlern betroffen sein. Dem Winkel zwischen Strecken, die in Linie liegende Schächte verbinden, wird daher eine gewisse Abweichung eingeräumt:

- *zwei aneinandergrenzende Linien gelten als in einer Achse angeordnet, wenn der Winkel zwischen ihnen maximal um 10° von 180° abweicht;*

Dieser Wert basiert auf der neurophysiologischen Erkenntnis, dass das menschliche Sehvermögen Winkeldifferenzen ohne Hilfsmittel mit einer Genauigkeit von etwa 5° bis 10° erkennen kann (CALVIN/OJEMAN 2000, 251).

Die Identifizierung von Bereichen, in denen ein- und dieselbe neolithische Gruppe mehrmals mittelbar hintereinander aktiv wurde, sollte sich durch Übereinstimmungen bei mehreren Phänomenen auszeichnen. Da diese Ähnlichkeiten wiederum von den erwähnten möglichen Fehlern betroffen sein können, sind auch hier Fehlermargen einzuräumen:

- *eine annähernde Parallelität der Schachtgruppenachsen wird angenommen, sobald die Winkel zwischen den Achsen der Gruppen kleiner sind als $25,01^\circ$ ($2 \times 10,01^\circ$ Methodenunschärfe + 5° neolithischer Meßfehler beim Gruppenbezug);*
- *die Regelabstände zweier benachbarter Gruppen gelten als gleich, wenn sie sich um maximal 15 %, bezogen auf die längste beteiligte Strecke, unterscheiden (10 % Methodenunschärfe + 5 % neolithische Abstandsnaachjustierung);*
- *ein Bezug in der Anordnung mindestens dreier benachbarter Schachtgruppen liegt vor, wenn ihre Enden maximal um einen halben Schachtabstand gegeneinander versetzt sind und sich in etwa in einer Flucht befinden;*

Alle bisherigen Fehlerquellen und Schwankungsfaktoren summieren sich in ihrer Auswirkung auf die Gestalt der Thiessenpolygone auf. Da selbst kleine Schwankungen schon größere Auswirkungen auf die Länge einer Thiessenpolygoneite haben, kann keinesfalls erwartet werden, dass wie in einer Idealanordnung gleichseitige Hexagone auftreten (vgl. BORKOWSKI 1995, 110). Hier wird daher angenommen:

- *Bereiche der Schachtverteilung gelten als regelmäßig, wenn mindestens zwei aneinandergrenzende Thiessenpolygone mit sechs Seiten vorhanden sind. Die Regelmäßigkeit dieser Bereiche geht auf alle Schächte in der Nachbarschaft eines sechsseitigen Thiessenpolygons zurück.*

Die Frage, ob verschiedene Schächte derselben Aktivität angehören, kann noch anhand einer weiteren Quelle untersucht werden, die von den bisher verwendeten Daten völlig unabhängig ist.

Ihre Aussagequalität ist allerdings eingeschränkt und die abgeleiteten Ergebnisse sind daher von wesentlich geringerer Güte als die der statistisch-geographischen Untersuchung. Gerade wegen der Unabhängigkeit der beiden Verfahren sind eventuelle Übereinstimmungen jedoch als besonders aussagekräftig anzusehen.

Es handelt sich bei dieser Quelle um die im Planum sichtbaren *Verfüllungsstrukturen* der Schächte. Bereits die Ausgräber in den 1980er Jahren berichteten von erkennbaren Strukturen in den Schachtverfüllungen (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 8 Abb. 7 und Abb. 13), die Binsteiner später Schüttkegel nannte (ders. 1990, 28). Aufgrund der unterschiedlich strukturierter und gefärbten geologischen Schichten – rostrote Mittel- bis Grobschotter, weißgraue Fein- und Mittelsande – entstanden nach der Verlagerung und der Vermischung dieser Materialien bei der Einfüllung in die Schächte dort feine Schichtstrukturen. Sie sind auf Plana und Profilen häufig gut zu erkennen, und basieren auf unterschiedlichen Mischungsverhältnissen dieser Sedimente (**Abb. 2.33**).

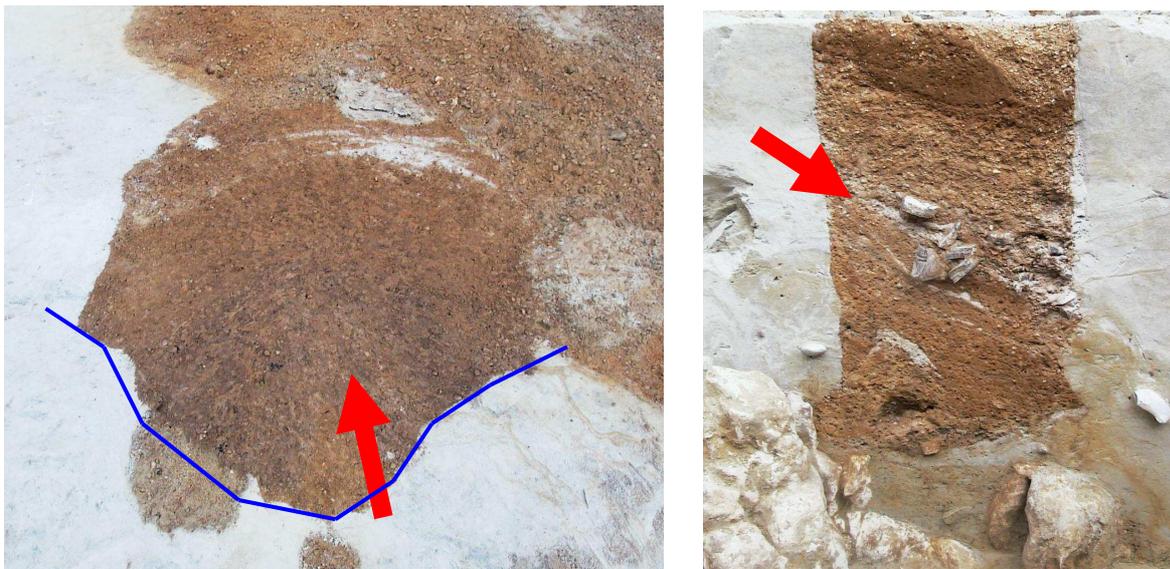


Abb. 2.33: Abensberg-Arnhofen. Halbkreis- und kegelförmige Muster in der Verfüllung von Schächten im Planum und im Profil.

Abgebildet sind Planum 4 von Schacht Nr. 150 (links) und Profil unter Planum 5 von Nr. 197 (rechts). Die roten Pfeile bezeichnen die Richtung, aus der scheinbar (vgl. Text) die Verfüllung erfolgte.

Bei Nr. 150 ist gut zu erkennen, wie die Schachtwand bei der Verfüllung durch das eingefüllte Sediment ausgeschlagen wurde. Der Wandabschnitt mit unregelmäßigem Verlauf liegt dort, wo das Verfüllungsmaterial an der Wand entlang rutschte (blaue Linie).

Bereits bei den Altgrabungen wurde in keinem Fall ein durch natürliche Prozesse verfüllter Schacht vorgefunden. Derartige Prozesse müssten sich durch einen Schichtenverlauf auszeichnen, bei dem die Schichten ausschließlich trichterförmig vom Rand zur Mitte hin einfallen.

An den Schachtsohlen würden dadurch kegelförmige Strukturen entstehen, deren tiefster Punkt jeweils in der Nähe des Schachtmittelpunktes liegen müsste. Dort sollten sich immer wieder eingespülte Feinsedimente sammeln und so tonhaltige Schluff- bzw. Feinsandlinsen bilden.

Auch bei den Projektgrabungen war bei den zahlreichen Profilen nur in einem einzigen Fall, und dann direkt unterhalb des Schachtmundes, bei Schacht Nr. 212 (Profilabschnitt II) eine schwach ausgeprägte Feinmateriallinse zu finden. Die natürliche Verfüllung der Schächte bis unmittelbar an den Schachtmund kann nach den Ergebnissen aller bisherigen Grabungen also ausgeschlossen werden.

In der Regel zeigten die Profile den bereits von der Altgrabung bekannten (vgl. BINSTEINER 1990), typischen Aufbau mit zur Mitte hin kegelförmig ansteigenden Verfüllschichten. Wenn ein aufgelassener Schacht, ein sog. Toter Mann, vom Menschen zugefüllt wurde, dann schaufelte, kippte oder schob man Kies und Sand hinein. Nach kurzer Zeit bildete sich im Zentrum der Sohle ein kleiner Kegel oder eine schräge Ebene (BINSTEINER 1990, 28; vgl. ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 9 Abb. 7 und Abb. 13), die an eine Wand angelehnt war. Binsteiner konnte dieses Phänomen an zahlreichen Profilen belegen (ders. 1990, 28). Hier wurden für die Untersuchung dieses Phänomens die Plana benutzt.

Wie verhält sich nun *Sediment*, das von oben in einen Schacht gefüllt wird? Die ersten kleineren Packungen türmen sich an der Sohlenmitte zu einem Kegel auf oder lagern sich an einer Wand an. Im zweiten Fall ist die Sohle nach kurzer Zeit eine schiefe Ebene. Füllt man weiter ein, entstehen charakteristische Formen. Nach dem Aufschlag des Füllmaterials auf der Sohle rollt oder rutscht es dort noch den Kegel oder die schiefe Ebene herunter. Dabei sortiert sich das Material zusätzlich selbst nach Körnung bzw. Gewicht – schwerere und größere Körner rollen weiter, kleinere verkeilen sich schnell zwischen den anderen. Das Material lagert sich also seitlich an den Kegel bzw. die Ebene an. Schneidet man solche Strukturen im Planum, erhält man kreis- oder halbkreisförmig bis mandelförmig verlaufende Grenzen zwischen den Schichten aus unterschiedlichem Schüttgut. Verlagert sich während des Verfüllens das Zentrum der Schüttung, sind die Schichtgrenzen im Planum in der Art eines Ying-Yang-Symbols verzahnt. Verfüllungsschichten, die eine kreis- oder halbkreisförmige bis mandelförmige bzw. verzahnte Anordnung zeigten, konnten im Planum 4 in mehr als hundert Fällen im Bereich der Kiesgrube dokumentiert werden.

Die gedankliche *Rekonstruktion der Schachtverfüllung* führte zur Entdeckung eines bisher noch nicht erkannten, weiteren Effektes, mit dem sich dieser Prozess auf die Schachtwände auswirkt. Beim Einfüllen des Sediments in den Schacht schlug es im Sturz an die Schachtstöße an. Davon war vor allem die Wand unter seinem Eintrittspunkt in den Schacht betroffen.

Bei viel Schwung konnte es aber auch die gegenüberliegende Wand sein (vgl. u. Abb. 2.35), an der das Füllmaterial beim Hinunterfallen anschlug. Dabei wurde manchmal die nur aus Kies bzw. Sand bestehende Wand so erschüttert, dass Teile ausbrachen und der eigentlich regelmäßig gerundete Querschnitt eines Schachtes dadurch verändert wurde. Den gleichen Effekt konnte auch das Entlangrutschen des Sediments an der Wand haben. An diesen Stellen entstanden durch das Ausbrechen von Wandpartien ebenfalls Beschädigungen an der Schachtwand, die sich im Planum als kantige und unregelmäßige Abschnitte der ansonsten beinahe kreisrunden Schächte abzeichneten. Solche Veränderungen sind bei sehr vielen Schächten zu beobachten. In der Regel sind die Beschädigungen im Mittelteil der Schachtröhre am größten. Dort war die Wahrscheinlichkeit am größten, dass von oben herab geworfenes Material an die Wände schlug.

Ganz ähnliche Beobachtungen konnten die Ausgräber des französischen Bergwerks Jablines machen (BOSTYN/LANCHON 1992, 78ff.; vgl. u. 2.1.8.). Dort ließ sich bei mehreren Schächten die Verfüllungsgeschichte im Detail nachvollziehen. Es zeigte sich, dass zahlreiche Schächte absichtlich vom Menschen zugefüllt wurden. Die Wände dieser Schächte wiesen deutlich erkennbare Beschädigungen durch das Verfüllen auf (a. a. O., 79 Fig. 59, 81 Fig. 62 und 85 Fig. 69). Ursprünglich handelte es sich um regelmäßige senkrechte Röhren, wobei der Durchmesser in der Regel deutlich größer ausfiel als in Arnhofen. Manchmal waren ganze Wandpartien ausgebrochen und die Schächte wiesen im Profil kaum noch Reste ihres ursprünglichen Querschnittes auf (a. a. O., 85 Fig. 69).

Von diesen Veränderungen waren vor allem zwei Niveauabschnitte der Schächte betroffen. So vergrößerten die Beschädigungen im Bereich der Schachtmünder teilweise die Durchmesser der Befunde auf mehr als das Doppelte. Dabei wurden die Wandpartien der oberen zwei Meter vollständig zerstört und die Ausgrabung konnte nur noch die veränderte Situation dokumentieren. Der andere schwer betroffene Bereich waren die Wände im Bereich zwischen 3 m und 6 m Tiefe. Die so beschädigten Schächte in Jablines besitzen Wände, die fast ausschließlich von Kalken gebildet werden. Diese Wände waren also ungleich standfester als die in Arnhofen, die ja nur aus Kiesen und Sanden bestanden. Trotzdem wurden sie so stark beschädigt, dass kaum noch ursprüngliche Wandpartien übrig blieben, um ihr ehemaliges Aussehen zu rekonstruieren.

Angesichts dieser Beobachtungen muss man in Arnhofen davon ausgehen, dass fast alle Schachtmünder mehr oder weniger starke Veränderungen dieser Art aufweisen. Aber auch die tieferen Partien der Arnhofener Schächte wurden bei der Verfüllung durch den Menschen mal mehr, mal weniger stark in Mitleidenschaft gezogen. Besonders gut erkennbar sind solche Beschädigungen, wenn sie neben noch erhaltenen Wandpartien auftreten.

In den Plana kann man wieder beobachten, dass der Umriss eines Schachtes zum Teil einen regelmäßigen, gerundeten Verlauf aufweist, in anderen Abschnitten aber unregelmäßig Ausbuchtungen oder auch mehr oder weniger gerade verlaufende Partien besitzt. Dabei lassen sich die französischen Erkenntnisse über die Tiefen, in den die Beschädigungen auftreten, nicht eins zu eins nach Arnhofen übertragen, da die Schachtdurchmesser hier noch einmal deutlich schmaler sind, also andere Einfallswinkel auftraten und daher auch das Auftreffen an den Wänden in anderen Höhen erfolgte. Festzuhalten bleibt: Die Verfüllung der Schächte durch den Menschen erklärt sowohl die Stratigraphie der Schachtprofile als auch die unregelmäßigen Wandpartien, die bei zahlreichen Schächten in den Plana zu beobachten waren.

Binsteiner brachte das Phänomen der Schachtverfüllung mit der *Nutzungsgeschichte* nebeneinander liegender Schächte in Zusammenhang und folgerte aus der Ausrichtung bzw. dem Einfallswinkel der Schachtverfüllungen, dass Schächte mit dem Aushub benachbarter Anlagen verfüllt wurden (BINSTEINER 1990, 31), sie also im Zuge einer Aktivität direkt nacheinander angelegt wurden. In einem Fall konnte dies zusätzlich durch den Fund einer extra für diese Arbeiten angelegten, oberflächennahen Verbindungsrinne zwischen zwei Schächten bestätigt werden (BINSTEINER 1990, 18ff. und 31; ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 12).

Dass die Verfüllung der Schächte unmittelbar nach ihrer *Auflassung* erfolgt sein muss, legen auch die Erkenntnisse der Projektgrabungen nahe: Bei schlechtem Wetter zeigten vor allem die Schachtwände im Bereich der Molassesande binnen kürzester Zeit Erosionserscheinungen. Da aber die Schachtumrisse bei fast allen der mehr als 200 Schächte, die mit den tief gelegenen Plana erfasst wurden, gut erhalten waren, kann generell von einer schnellen Wiederverfüllung der Schächte ausgegangen werden. Auch traten in den Verfüllungen immer wieder Linsen aus untermischten weißgrauen Molassesanden auf. Dies wäre nicht möglich, wenn der Sand an der Oberfläche über längere Zeit zusammen mit den rostroten Schottern gelagert worden wäre. In diesem Fall hätten Regen und Vertritt zu einer Untermischung des feinkörnigen Materials unter die grobkörnigen Schotter und somit zu einer Umfärbung geführt. Bergbautechnisch gesehen war aus Sicherheitsgründen sowieso spätestens bei der Anlage eines neuen Schachtes neben dem toten Mann dessen parallel erfolgende Verfüllung notwendig.

Eine detaillierte Untersuchung der *Verfüllungsrichtung* erfolgte auf den im Planum 4 (Herbst 2000) aufgedeckten Bereichen des Kiesgrubenareals. Dabei wurde nur im Nordostbereich dieser Untersuchungsfläche die Richtung vor Ort in eine Planskizze dokumentiert, was ein genaues Übertragen auf den digitalen Plan ermöglichte. Südwestlich einer Linie, die den Nordostfortsatz von der Hauptfläche "abschnürt", wurde dieses Vorgehen nicht fortgesetzt (**Abb. 2.34**).

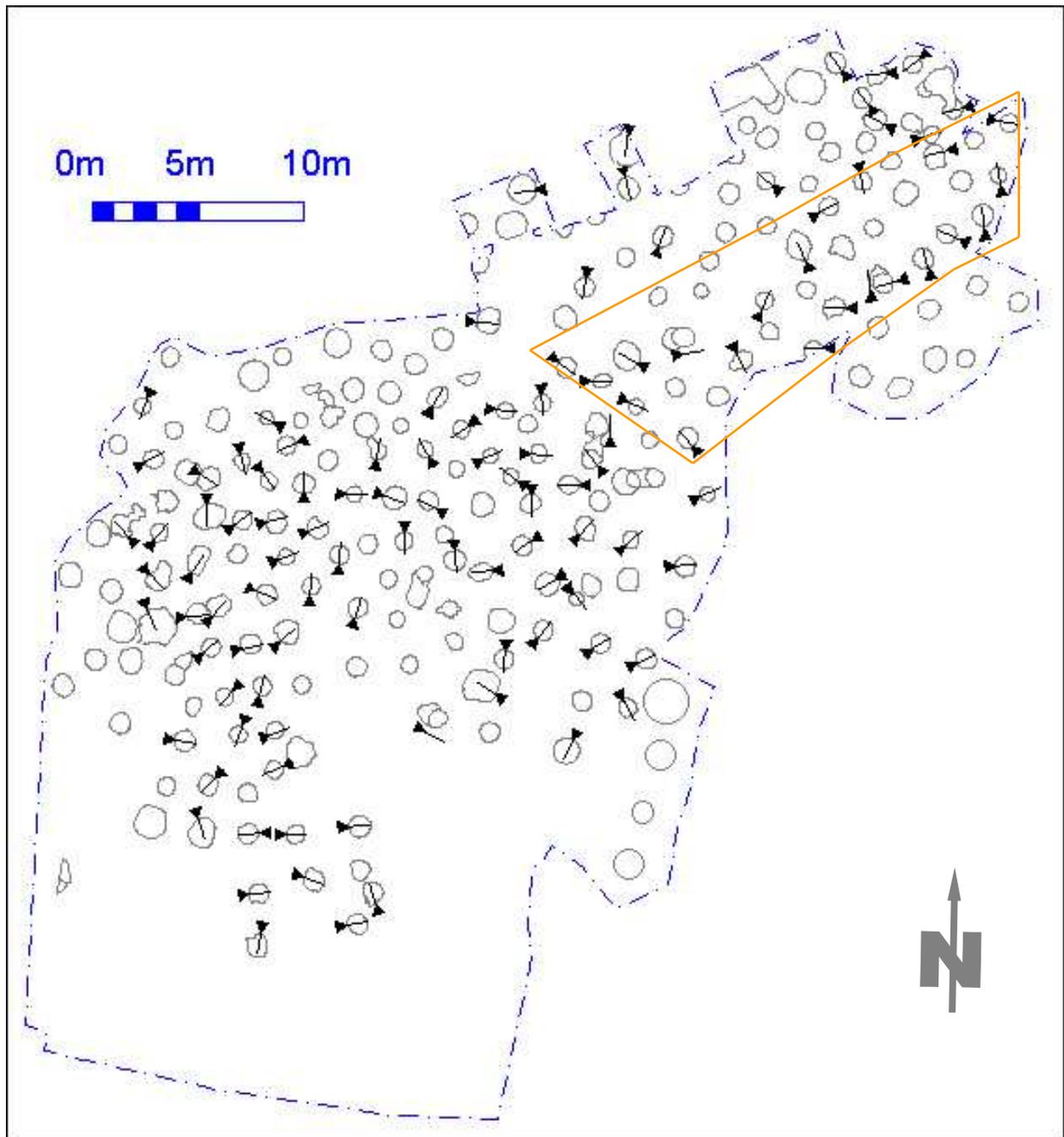


Abb. 2.34: Abensberg-Arnshofen. Verfüllungsachsen von Schächten in der Kiesgrube.

Die scheinbare Verfüllungsrichtung ist durch ein Dreieck, die Achse der Verfüllung durch eine anschließende Linie angegeben. Die Richtungen wurden überwiegend nach Schachtplana aufgenommen, die im Planum 4 dokumentiert sind. Innerhalb des orangen Trapezes liegt den Verfüllungsachsen eine detaillierte Befunddokumentation zugrunde, außerhalb davon sind sie nachträglich anhand von Planumsfotos erschlossen.

Hier musste die ungefähre Verfüllungsrichtung nach genordeten Planumsfotos erschlossen werden, was zu einer gewissen Ungenauigkeit geführt haben dürfte. Dabei könnte die geschätzte Einfüllungsrichtung bei undeutlichen Befunden um bis zu 20° von der realen abweichen.

Gründe dafür sind problematische Kameraperspektiven, Entfernung zum Objekt und vor allem schlechte Erkennbarkeit gleichfarbiger Schichten mit unterschiedlicher Körnung. Besonders im letzten Fall konnte wegen der z. T. nur schematisch durchgeführten Sedimentbeschreibung (ohne Beschreibung von Körngrößen und Bindigkeit) keine nachträgliche Trennung zwar gleich gefärbter aber ansonsten unterschiedlicher Schichten durchgeführt werden. Die Beschreibung der Sedimentunterschiede bei Feinkornsedimenten erfolgte dort später anhand von nur mittelscharf aufgelösten Digitalfotografien und ist nicht mit dem Nordostabschnitt vergleichbar. Eine Verfüllungsrichtung kann mit solchen Planumsfotos also nur ungenau erschlossen werden. Zudem ist ein zusätzlicher Fehler von bis zu 10° beim Positionieren des Nordpfeils auf den Fotos immer möglich. In einigen Fällen wurden jedoch die internen Schichtstrukturen eines Schachtes im Planum direkt tachymetrisch eingemessen. Dort war die Lokalisierung der Verfüllungsrichtung mit besonderer Genauigkeit möglich.

Eine Übersicht über die *Kartierung* der Verfüllungsrichtungen lässt schon Bezüge zwischen benachbarten Schächten vermuten. In 108 Fällen konnte anhand der Einfallsrichtung der unterschiedlich gekörnten und/oder gefärbten Verfüllungsschichten die Richtung bestimmt werden, aus der die aufgelassenen Schächte zugeschüttet worden waren. Dabei wurde grundsätzlich auf die Erkenntnisse der Planumsuntersuchung zurückgegriffen. Die Profile wurden aufgrund einer quellenkritischen Überlegung nicht genutzt. Wird ein senkrechter Querschnitt (Profil) durch eine schiefe Ebene gelegt, so ergibt dies allein keinen sicheren Hinweis darauf, in welcher Richtung die Ebene einfällt (Abb. 2.33 rechts). Sobald die Ausrichtung des senkrechten Schnittes in der Aufsicht auch nur um wenige Grad vom rechten Winkel zur Einfallsrichtung abweicht, ergibt sich bereits eine vermeintliche Einfallsrichtung, die stark von der wirklichen abweicht. Der Effekt ist beim Profil nicht zu erkennen, da man ja dort nur das Gefälle, nicht aber den Azimuth der schiefen Ebene sehen kann. Die Himmelsrichtung, aus der die Einfüllung erfolgte, ließe sich also nur vage schätzen. Auf die Rekonstruktion der Verfüllungsachse anhand von Profilen wurde daher verzichtet. Im Planum dagegen stellt die Abgrenzbarkeit der Schichten und die Eindeutigkeit der Strukturen die einzige Unsicherheit dar (Abb. 2.33 links).

Die Genese der *Schichtstrukturen* in der Verfüllung ist folgendermaßen zu erklären. An der Sohle einer Röhre (Schacht) entsteht durch zahlreiche abwechselnd gefärbte Einzeleinfüllungen (Korbfüllungen) der sog. Schüttkegel. Er liegt in der Mitte der Röhre oder ist an die Röhrenwand angelagert, die unmittelbar unter der Kante liegt, über die das Material eingefüllt wurde. Wird nicht jede Ladung aus exakt der gleichen Richtung eingefüllt, so tendiert das Gebilde an der Schachtsohle zur schrägen Ebene.

Bei einem waagrechten Schnitt durch diese Strukturen zeichnen sich um den Kegelmittelpunkt die unterschiedlichen Einfüllungsmaterialien als Kreise und Ellipsen bzw. deren Abschnitte ab. Dadurch entstehen ungefähr halbkreis- bis kreisförmige konzentrische oder mandelförmige Muster. Das Zentrum dieser Muster liegt näher an der Wand, von der aus die Verfüllung erfolgte. Die Verfüllungsrichtung ist dann einfach zu ermitteln, indem vom Schachtmittelpunkt über das Zentrum dieser Strukturen gepeilt wird. Es gilt daher:

- die Verfüllungsrichtung eines Schachtes kann auf die nächst jüngere Anlage innerhalb derselben Schachtgruppe "zeigen".

Mit den Beziehungen, die sich anhand der *Verfüllungsrichtung* unter den Schächten herstellen lassen, bietet sich die Möglichkeit zwischen den beiden Subvarianten der polygonen Gruppe – durchgehende Aktivität oder optimal verknüpfte lineare Aktivitäten – zu unterscheiden. Wenn bei einem Schacht an den Außenenden der ersten Zeile einer polygonen Gruppe die Verfüllungsrichtung auf die nächste (außen liegende) Zeile verweist, kann auf eine durchgehende Aktivität geschlossen werden, während der alle Schächte der polygonen Gruppe angelegt wurden.

Dies setzt voraus, dass das Verfüllen eines alten Schachtes mit dem Aushub eines neuen ohne Probleme zu bewerkstelligen war. Wenn die Situation an der Oberfläche jedoch eine unmittelbare Überführung des Aushubs verhinderte, könnten die Schächte einer Gruppe Verfüllungsrichtungen aufweisen, die vom Postulat abweichen. Da dies nicht ausgeschlossen werden kann, stellt die Verfüllungsrichtung eine weniger aussagekräftige Quelle dar, als die statistisch-geographischen Untersuchungsergebnisse.

Für Einbeziehung der Verfüllungsrichtung in die Argumentation zur *Schachtgruppenbildung* sind allerdings noch zwei Aspekte zu beachten.

Der erste ist für die Aussagequalität dieser archäologischen Quelle von großer Bedeutung. Die halbkreisförmigen Muster in den Plana entstanden – wie dargelegt – auf der Schachtsohle durch die Verfüllung (**Abb. 2.35**). Das von oben eingefüllte Material konnte aber auf unterschiedliche Weise in die Tiefe stürzen. Wurde es beispielsweise mit wenig Kraft über den Schachtrand geschoben, rutschte bzw. fiel es an der Wand direkt unter dem Punkt herunter, an dem es oben über die Kante gelangte. Bei einem schwungvollen Einfüllen – wenn z. B. die Ladung eines Förderkorbes mit Schwung in den Schacht geschüttet wurde – konnte das Material im Fallen an die gegenüberliegende Schachtwand anstoßen, bevor es die Sohle erreichte. In diesem Fall rutschte es ab dem Punkt der Kollision senkrecht an dieser Wand herunter. Diese Variante suggeriert im Befund eine Verfüllungsrichtung, die der tatsächlichen um 180° entgegengesetzt ist.

Da grundsätzlich nicht mehr festzustellen ist, mit wieviel Schwung eingefüllt wurde, kann man also nur die *Achse der Verfüllung*, nicht aber deren genaue Richtung identifizieren.

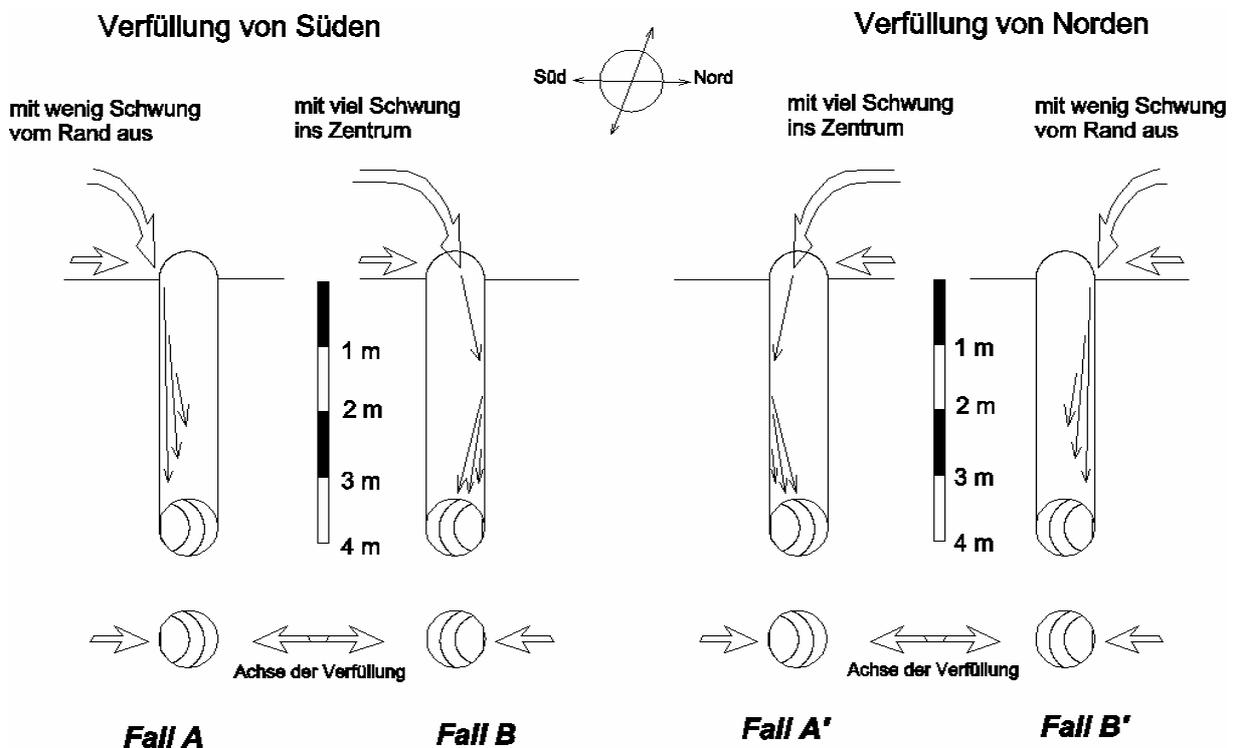


Abb. 2.35: Idealschema der Entstehung halbkreisförmiger Muster bei der Verfüllung von Schächten.

Bei einer immer aus derselben Richtung erfolgenden Verfüllung mit verschiedenartigem Erdreich entstehen bei verändertem Kraftaufwand durch Sortierung während des Fallens und des Ausrollens auf den Schüttkegeln unterschiedliche, halbkreisförmige Muster in einem Planum. Gleiche Muster (A und A') können durch Einfüllungen mit verschiedenem Kraftaufwand aus in 180° entgegengesetzt liegenden Richtungen erzeugt werden, während um 180° gedrehte Muster (A und B) durch Einfüllungen aus derselben Richtung entstehen können.

Es ist anzunehmen, dass die einzelnen Verfüllungsladungen in den tieferen Schachtbereichen mit größerer Wahrscheinlichkeit schon einmal an eine Wand angestoßen waren, bevor sie unten auftrafen. Je tiefer nämlich das Material hinunterstürzte, desto weniger Schwung musste es oben mitbekommen haben, um schließlich doch noch die gegenüberliegende Wand zu treffen. Die für die Untersuchung genutzten Befunde wurden in ca. 4 m Tiefe dokumentiert (Kiesgrube, Planum 4, Herbst 2000). Leider konnte bei der Dokumentation des ca. 3 m tief gelegenen Planums 3 (Notgrabung Frühjahr 2000) im Kiesgrubenareal dieses Phänomen aufgrund des Zeitmangels nicht ausreichend berücksichtigt werden, um hier ausgewertet werden zu können. Bei den vorliegenden Befunden ist also eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Phänomen der Richtungsänderung gegeben. Bei der Auswertung sind deshalb stets beide Richtungsvarianten denkbar.

Scheinbar um 180° “falsch“ liegende Verfüllungsrichtungen innerhalb einer Gruppe sind daher kein Widerspruch, sondern im Gegenteil eine Stütze für die zugrunde gelegte Beziehung der Schächte dieser Gruppe.

Für das Konzept folgt daraus eine weitere Einschränkung der Aussagemöglichkeit:

- *nicht die sichtbare Richtung, sondern nur die Achse der Verfüllung kann als Beleg der Beziehung zwischen Schächten verwendet werden – jede Achse steht für zwei entgegengesetzte Varianten.*

Der zweite Aspekt bezieht seine Grundlage aus bergbautechnischen Überlegungen: Die Bergleute, die den Versatz aus dem neuen Schachte an die Oberfläche förderten, um ihn dann in den Toten Mann zu kippen, werden sich bei dieser Tätigkeit kaum auf dem Steg zwischen dem neuen und dem alten Schacht aufgehalten haben. Dieser Bereich war in der Regel weniger als 1 m breit (vgl. o. 2.1.4.2.), da die Schächte zur Mündung hin leicht trichterartig geformt waren. Es erscheint wenig plausibel, dass die neolithischen Bergleute den Steg mit ihrem Gewicht und dem des Aushubmaterial zusätzlich belasteten.

Das bedeutet aber, die *Verfüllungsrichtung* weist nicht direkt vom neuen zum alten Schacht. Die bei der Förderung und der Verkipfung des Versatzes aktiven Personen dürften sich etwas seitab von der Verbindungslinie zwischen beiden Schächten aufgehalten haben. Am sichersten war es für die Bergleute dabei, wenn ihre Position und die beiden Schächte ein gleichseitiges Dreieck mit der Schachtverbindung als Basislinie bildeten. Die Verfüllungsstrukturen weisen in diesem Fall auf das Zuschütten aus einem Sektor hin, der leicht links oder rechts seitab von der direkten Verbindungslinie zwischen altem und neuem Schacht liegt. Demnach sollten in einer linearen Schachtgruppe die Verfüllungsrichtungen der Schächte mindestens jeweils etwa 30° gegen die Triangulationslinien verschoben sein. Beim letzten Schacht der Gruppe ergibt sich demnach keine bevorzugte Verfüllungsrichtung postulieren.

Die oben erwähnten möglichen *Fehler* bei der Bestimmung des Winkels fallen nur dann ins Gewicht, wenn sich dadurch der erwartete Winkel ($\sim 30^\circ$) zwischen der Verfüllung und der die Schächte verbindenden Triangulationslinien vergrößert. Dies trifft bei einem Zufallsfehler aber nur in 50 % aller Fälle zu. Aufgrund der mit diesem Vorgehen verbundenen Ungenauigkeit und Subjektivität ist die Stärke des Argumentes Verfüllungsrichtung relativ eingeschränkt. Der geographisch-statistischen Gruppenbildung nach den oben entwickelten objektiven Kriterien wird daher stets der Vorrang gegenüber der Verfüllungsrichtung eingeräumt. Die Verfüllungsrichtungen wurden nur bei Schächten, die zu Gruppen zusammengefasst wurden, in die Diskussion einbezogen. Dort gelten sie bei Übereinstimmungen als zusätzliches Indiz.

Bei Schächten, die mit der geographisch-statistischen Auswertung keiner Gruppe zugeordnet werden konnten, wurde die vergleichsweise ungenaue Methode nicht zur Herstellung von Bezügen zwischen Schächten bzw. für eine Gruppenbildung benutzt.

Eine *kritische Anmerkung* beschließt die methodischen Erörterungen zur Bildung von Schachtgruppen. In Einzelfällen kann es trotz aller Bemühungen zu Mehrdeutigkeiten bezüglich möglicher Gruppenbildungen kommen. Etwa wenn zwei Möglichkeiten zur Bildung einer linearen Gruppen vorhanden sind, weil sich zwei Gruppen von in Achse liegenden Schächten mit gleichem Abstand kreuzen. Hier wurde diejenige Variante gewählt, die die Kriterien besser erfüllte. Dieser Fall trat nur einmal in der Kiesgrube auf.

Abschließend sei betont, dass die im Folgenden durchgeführte *Schachtgruppenbildung* nur eine argumentativ gut untermauerte Annäherung an die historischen Verhältnisse darstellt. Sie ist keine im wissenschaftstheoretischen Sinne wahre, deskriptive Aussage. Das entworfene historische Bild ist nach Ansicht des Verfassers die zur Zeit am besten begründete Antwort auf die Frage nach der Bergbauorganisation in Arnhofen. Das Szenario, welches in den beiden nächsten Abschnitten gezeichnet werden wird, beansprucht nicht, die einzig mögliche historische Wahrheit zu sein, sondern nur, das wahrscheinlichste Abbild der prähistorischen Wirklichkeit wieder zu geben. Im Vorgriff kann aber hier schon erwähnt werden, dass es eine hohe Plausibilität auf seiner Seite hat. Wie weiter unten noch gezeigt werden wird, stützen sich nämlich die Ergebnisse voneinander unabhängiger Auswertungsschritte gegenseitig (vgl. u. Kap. 2.2. Abb. 2.49). Der sich im Abschnitt 2.1.8. anschließende Vergleich mit Raumnutzungsmustern auf anderen neolithischen Bergwerken weist in eine ähnliche Richtung. Demnach ist es wahrscheinlich, dass mit den Ergebnissen der nächsten beiden Abschnitte tatsächlich die Prinzipien der Arnhofener Bergbauorganisation wenn schon nicht im Detail so doch modellhaft erfasst werden.

2.1.6. Schachtgruppen in der Kiesgrube

Wendet man die im vorangegangenen Abschnitt entwickelten Kriterien auf das Kiesgrubenareal an, lassen sich zahlreiche Gruppen bilden (Abb. 2.36). Sie liegen vor allem im Bereich der wa-
benförmigen Thiessenpolygone.

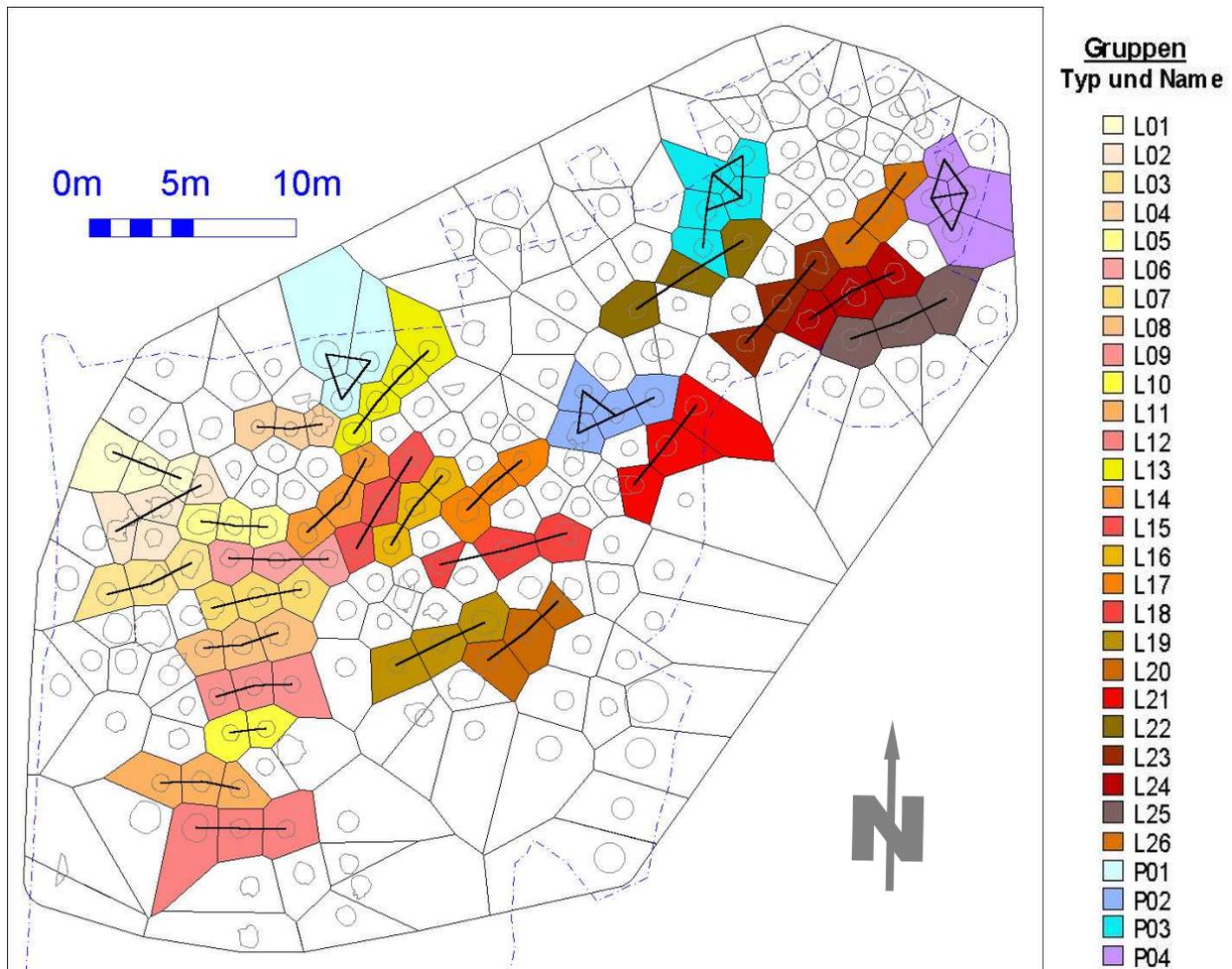


Abb. 2.36: Abensberg-Arnhofen. Schachtgruppen im Bereich der Kiesgrube.

Die Schächte einer Gruppe sind mit schwarz markierten Triangulationslinien verbunden. Die Thiessenpolygone der Schächte einer Gruppe sind gleich eingefärbt: lineare Gruppen in Gelb-, Rot- und Brauntönen, polygone Gruppen in Blautönen.

Bei der *Darstellung* der Gruppen sind die Triangulationslinien hervorgehoben, die für ihre Erfassung benutzt wurden. Die Thiessenpolygone aller Schächte einer Gruppe sind gleich eingefärbt. Die restlichen Thiessenpolygone und Triangulationslinien bleiben ungefüllt bzw. werden nicht dargestellt. Die Gruppen sind mit "L" für linear und "P" für polygon bezeichnet. Die Nummerierung erfolgte für jede der beiden Gruppenarten getrennt. Die Zählung der linearen Gruppen beginnt in der Nordwestecke der Fläche und wird nach Süden fortgesetzt. Bei Erreichen des südlichen Endes einer Kolumne von Schächten springt sie wieder zurück an den Nordrand.

Von dort wird wieder weiter nach Süden gezählt. Das Verfahren wiederholt sich bis alle linearen Gruppen erfasst sind.

Dadurch entstehen zwei Nord-Süd orientierte Kolumnen von linearen Gruppen: L 01 (hell beige) bis L 03 (hell ocker) und L 04 (orange) bis L 12 (hellrot). Bei den verschachtelter liegenden Gruppen L 13 (intensiv gelb) bis L 20 (hellbraun) wurde bei L 13 bis L 17 (dunkles orange) von Nordwesten nach Südosten und ab L 18 (rot) wieder nach Süden weiter gezählt. L 21 (glutrot) liegt als vereinzelte lineare Gruppe zwischen dieser Kolumne und der wiederum von Nordwest nach Südost durchnummerierten Kolumne L 22 (olivebraun) bis L 25 (dunkelbraun). Die ockerbraune Gruppe L 26 ganz im Nordosten der Untersuchungsfläche bildet den Abschluss dieser Zählung.

Aufgrund der Anzahl und der Lage der polygonen Gruppen genügte bei ihnen eine Numerierung von West nach Ost. Sie beginnt mit P 01 (hellblau) in der Mitte des Nordrandes der Untersuchungsfläche und endet mit P 04 (lila) am Nordostrand.

Bei den linearen wie den polygonen Gruppen gibt die Numerierung keine Auskunft zu ihrer historischen Abfolge.

Insgesamt lassen sich 30 *Gruppen* bilden. Vier davon sind polygonen, die 26 anderen lineare Anordnungen. Sie umfassen zusammen 94 der 227 Schächte (41,4 %) auf der Untersuchungsfläche. Auf die linearen Gruppen entfiel mit 78 Schächten der Löwenanteil (34,4 Prozentpunkte). Nur 16 Schächte (7 Prozentpunkte) wurden zu polygonen Gruppen zusammengefasst. Nach ihrer Häufigkeit (24 von 30) zu urteilen, bilden die linearen Gruppen (aus drei Schächten) klar die bevorzugte Art der Schachtanlage für eine Bergbauaktivität. Vergleicht man das Ergebnis mit der Triangulation (s. o. Kap. 2.1.3. Abb. 2.11), so fällt auf, dass man bei einer rein visuell vorgenommenen Gliederung wesentlich größere Anzahlen von Schächten in einer Gruppe erwartet hätte. Die strengen Anforderungen, die hier an die Gruppenbildung gestellt werden, gewährleisten eine hohe Stabilität und eine direkte Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Für das weitere Vorgehen (Bildung von Schachtgruppenverbänden, s. u.) ist es unbedingt notwendig, um nicht bei arbiträren Unterteilungen zu enden. Bei einer willkürlich nach Augenmaß vorgenommenen Gruppenbildung wären die Ergebnisse derartig von Unsicherheiten belastet, dass eine weitere interpretative Auswertung den Charakter des Beliebigen erhalten hätte. Für die Untersuchung der Bergbauorganisation wäre das nicht zielführend.

Die *linearen Gruppen* bestehen in der Regel aus drei Schächten, nur jeweils einmal wird diese Zahl um eins über- (L13) bzw. unterschritten (L10). Der zweite Fall (L 10, gelb) muss näher erläutert werden.

Bei dem hier angewendeten Gruppierungsverfahren ist es eigentlich nicht möglich (s. o. Kap. 2.1.5.), Zwei-Schacht-Gruppen zu erkennen, da es nur eine sie verbindende Triangulationslinie gibt. Um Ähnlichkeiten festzustellen bedarf es aber mindestens zweier Linien.

Bei der Zwei-Schacht-Gruppe (L 10, gelb) wird die Verbindung durch *archäologische Beobachtungen* wahrscheinlich. Der östliche der beiden Schächte weitet genau auf dem gleichen Niveau, auf dem der westliche das Flöz anschnitt. Allerdings war der östliche in dieser Höhe von sterilem Sand umgeben. Beim östlichen Schacht gab es also nicht den geringsten Anlass, eine Weitung anzulegen. Noch spannender ist allerdings, dass die vom östlichen Schacht vorgetriebene Weitung auch noch genau in Richtung des westlichen Schachtes vorgetrieben wurde. Man gab diese Weitung erst auf, als man erkannt hatte, dass die vorgefundenen Hornsteine nicht zum Flöz gehörten, sondern zum Schlagabfall, der in den westlichen Schacht verfüllt wurde.

Aus den archäologischen Beobachtungen lassen sich wichtige Erkenntnisse ableiten. Die Anlage des westlichen Schachtes erfolgte zuerst. Wichtiger allerdings ist der damit erbrachte Beweis, dass die zur Fahrt benutzten Seile exakte Längenmarkierungen aufweisen mussten. Ohne diese Markierungen hätten die Bergleute nicht feststellen können, wann der Vortrieb im neuen Schacht das aus dem alten Schacht bekannte Flözniveau erreicht hatte. Im vorliegenden Fall war der alte Schacht schon verfüllt, als der neue mit seiner Weitung bis zu ihm vorstieß. Eine direkte Messung des Flözniveaus im alten Schacht war nicht mehr möglich, man hatte sich also das Niveau gemerkt. Demnach wurde nicht nur die Lage der Schächte genau eingemessen, sondern man merkte (!) sich auch noch die Tiefe und die Ergiebigkeit des Flözes, das zuvor in den aufgelassenen Schächten angetroffen wurde. Diese Information wurde dann bei der Anlage neuer Schächte berücksichtigt. Die Neolithiker erzeugten sich durch die Tiefenmessungen geradezu einen *drei-dimensionalen Plan* der Situation.

Die Lage der Schachtgruppe L 10 ist außerdem aus zwei Gründen besonders erwähnenswert. Erstens füllt sie genau den Bereich zwischen zwei Gruppen aus, die auf geographisch-statistischem Wege gebildet wurden. Zweitens harmonisiert ihre West-Ost-Orientierung mit der Ausrichtung ihrer nördlichen und südlichen Nachbargruppen. Die archäologisch begründete Zusammenfassung dieser beiden Schächte stützt die geographisch-statistische Gruppenbildung somit auf bemerkenswerte Weise.

Bei den *polygonen Gruppen* wurden drei bis fünf Schächte zusammengefasst. Die Elementarform der polygonen Gruppe tritt mit P 01 (hellblau) nur einmal auf. Möglicherweise liegen jedoch weitere Schächte, die dieser Gruppe zugeschlagen werden könnten, einfach nördlich außerhalb der Untersuchungsfläche.

Auch ist der unmittelbar südwestlich der Gruppe gelegene Schacht im Planum 4 nur zum Teil erfasst worden, so dass die Setzung der Mittelpunktskoordinate und somit eine mögliche Gruppenzuweisung stärker von Fehlern belastet sein kann^{2.7}. Bei den anderen drei polygonen Gruppen ist deutlich eine Ausrichtung zu erkennen. Die Startzeile auf der Seite des Bergwerkszentrums ist bei den Dreien jedoch unterschiedlich stark besetzt. Sowohl ein (P 02 himmelblau), wie zwei (P 03 türkisblau) als auch drei Schächte (P 04 lila) kommen vor. Die zweite Zeile umfasst dann zweimal zwei (P 03 und P 04) und einmal drei Schächte (P 02).

Die *Lage der Untersuchungsfläche* am Rand des Bergwerkes erweist sich im Nachhinein als vorteilhaft für die Untersuchung der Abbauorganisation (vgl. o. 2.1.4.2.). Hier wurde das ursprüngliche Schema der ersten Abbauphase kaum durch das nachträgliche Niederbringen weiterer Schächte verändert, die das "originale" Muster stören. Die Ermittlung der direkten Nachbarn via Triangulation konnte daher viele zusammengehörende Schächte erfassen. Im südlichen Drittel der Fläche macht sich allerdings das "Abtauchen" des Flözes stärker bemerkbar. Allgemein fiel es schwer, Schächte, die am Rand der Ausgrabungsfläche liegen, einzelnen Gruppen zuzuweisen. Dies hängt wahrscheinlich mit dem Ausschnitt der Untersuchungsfläche und der vorherrschenden Gruppenart zusammen. So kommen am Ostrand zusätzlich zum unregelmäßigen Verlauf der Grabungsgrenze häufiger ein oder zwei Schächte zwischen den dortigen Gruppen und dem Rand zu liegen. Wenn grundsätzlich eine Drillingskonstellation angenommen werden kann, ist zu vermuten, dass der jeweils "fehlende" Schacht außerhalb des Flächenrandes liegt bzw. lag^{2.8}.

In der äußersten Nordostecke nördlich von L 26 (ockerbraun) und östlich P 03 (türkisblau) ist die *Schachtdichte* sehr hoch. Dies und mehrere Überschneidungen zwischen Schächten, die noch bis in über 4 m Tiefe reichen, weisen auf eine schlechte Erhaltung des ursprünglichen Schachtmusters hin. Bei solchen Verhältnissen kann eine Methode, die jeweils die direkten Nachbarn verbindet, nicht mehr sinnvoll arbeiten. Eine Suche nach zusammengehörenden Schächten auf der Basis der Triangulationslinien verläuft in solch einem Fall ergebnislos.

^{2.7} Von den Triangulationslinien, die diesen Schacht mit der Gruppe P 01 verbinden hat eine sogar das exakt gleiche Maß wie die benachbarte Linie in P 01 (2,30 m). Die andere ist um 13 cm zu kurz – das Zehn-Prozent-Kriterium ist um 4,5 Prozentpunkte überschritten.

^{2.8} Die Schächte direkt östlich der Kiesgrubenfläche wurden durch den Kiesabbau bereits vor Grabungsbeginn weitgehend zerstört. Vielleicht existieren noch letzte Reste ihrer Sohlenbereiche. Diese liegen dann aber unter der Arbeitssohle der Kiesgrube bzw. der Zufahrt.

Nördlich und westlich von P 02 (himmelblau) liegt eine größere *Lücke* in der Schachtverteilung. Die Ursache hierfür ist wahrscheinlich eine Doline im Jurakalk (s. u. 2.3. Abb. 2.51). Bei ihrem Einsturz während des Quartärs riss sie das Flöz über sich mit in die Tiefe. Danach füllte sich der Einsturztrichter wieder mit Schottern und war von der Oberfläche höchstwahrscheinlich nicht mehr zu erkennen. Für die neolithischen Bergleute, die im Bereich der im Untergrund verborgenen Doline kein Flöz mehr fanden, sah es so aus, als ob hier der Rand des Vorkommens erreicht sei. Es wurde daher zunächst kein weiterer Schacht mehr in diese Richtung angelegt. Erst als man an anderen Stellen weiter südwestlich wieder fündig wurde, erkannte man den Irrtum und schob auch in diesem Bereich die Abbaufont weiter nach Süden vor. Das führte zu einem Zwischenraum, der den Lücken am Rand des Bergwerkes ähnelt. Die Schachtanordnung südwestlich der Doline zwischen den Gruppen L 13 bis L 17 sieht so aus, als ob hier mehrere Zweiergruppen vorhanden wären^{2,9}.

Schließlich sind noch drei *“interne Fehlstellen“* zu erwähnen. Damit werden Bereiche im Inneren der Untersuchungsfläche bezeichnet, in denen zwar zahlreiche Schächte vorliegen, aber keine Gruppen gebildet werden konnten. Die erste dieser Stellen liegt im nordwestlichen Zentrum der Untersuchungsfläche zwischen L 04 (fahl orange) im Norden, L 05 (hellgelb) im Süden und L 14 (orange) im Osten. Die Zweite befindet sich genau im Zentrum der Fläche nordöstlich und südwestlich von L 18 (rot). Die Dritte zieht sich zwischen L 22 (olivebraun) und L 23 (rotbraun) dahin und läuft nordöstlich von P 03 (türkisblau) und L 21 (glutrot) weiter bis zur Grabungsgrenze. Alle drei liegen in einem Areal mit hoher Schachtdichte. Hier könnten Störungen des ursprünglichen Musters durch irregulär (später) gesetzte Schächte zum Versagen der Methode geführt haben. Dafür reicht es ja, wenn jeweils nur ein Schacht *“zuviel“* vorhanden ist.

Die gemeinsame Kartierung von Schachtgruppen und *Verfüllungsrichtungen* zeigt sowohl Konstellationen, die sich gegenseitig stützen, als auch solche, die indifferent sind oder sich widersprechen (**Abb. 2.37**).

Für alle Gruppen im Nordosten einschließlich P 02 (himmelblau) und L 21 (glutrot) ist eine genauere Überprüfung auf Widersprüche nötig (vgl. Kap. 2.1.5.). Dies betrifft vor allem L 21 und L 24 (dunkelbraun). Bei P 02 selbst ist die aus den Verfüllungsrichtungen erschließbare Abfolge der Schächte (Südwest-Nordwest-Zentrum-[Nordost]) durchaus denkbar.

^{2,9} Tatsächlich liegen zweimal zwei in Nordwest-Südost hintereinander gestaffelte Triangulationslinien (2,19m und 2,23 m bzw. zweimal 1,79 m) vor, die das Maß der längsten Triangulationslinie aus den umgebenden Gruppen reproduzieren (L 14: 1,9 m, L 15: 2,29 m, L 16: 2,67 m, L 17: 2,21 m, L 18: 1,7 m und P 02: 2,09m).

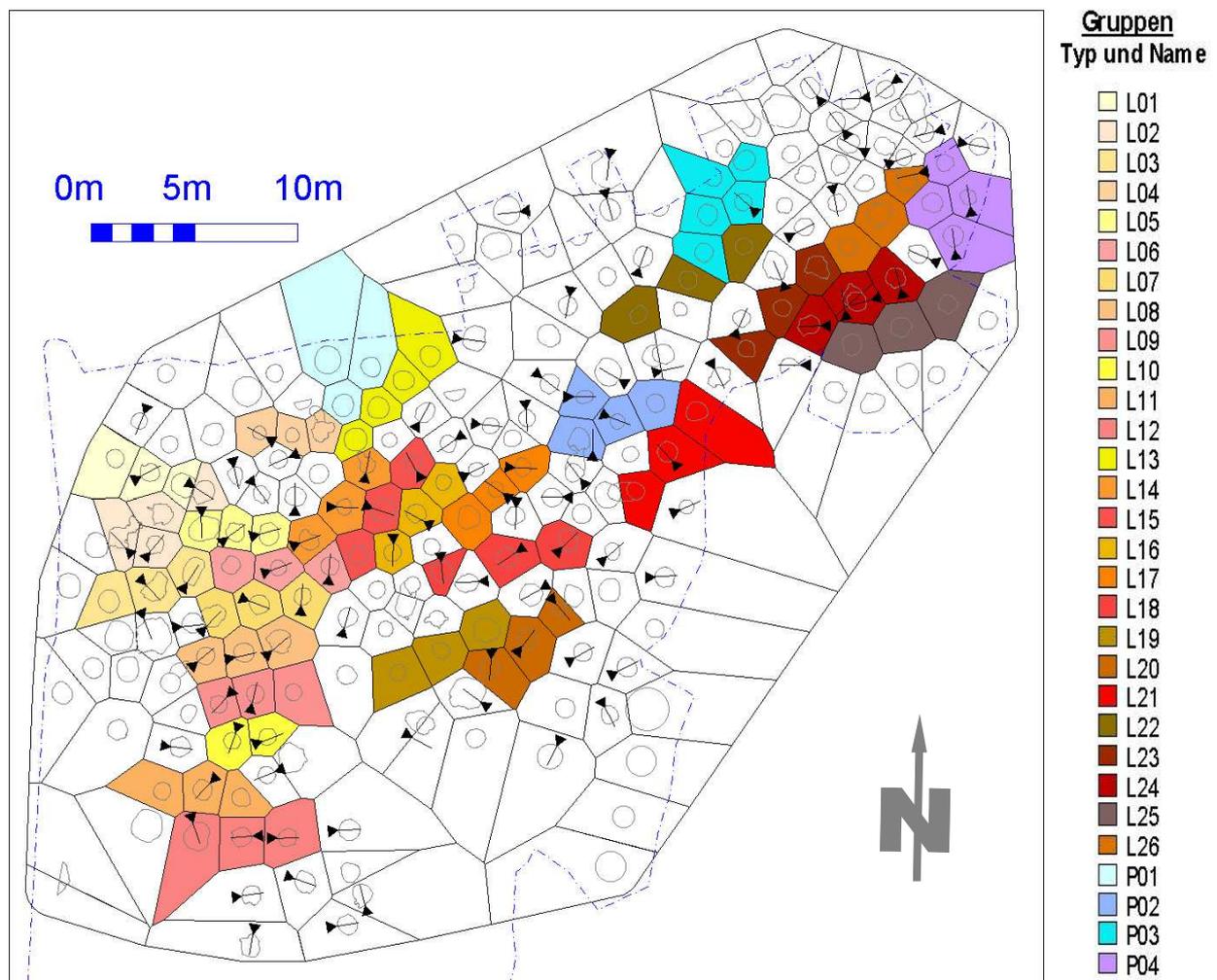


Abb. 2.37: Abensberg-Arnhofen. Schachtgruppen im Bereich der Kiesgrube und Verfüllungsachsen der zugehörigen Schächte. Die vermeintliche Verfüllungsrichtung ist durch ein Dreieck, die Achse durch die anschließende Linie wiedergegeben.

Bei L 24 weist der mittlere Schacht eine nicht akzeptable Abweichung bei der Verfüllungsachse auf. Dieser Schacht wird von einem anderen geschnitten, der nur wenige Dezimeter weiter südlich angelegt wurde und den Ersteren weitgehend überdeckt. Der nördliche der beiden erfüllt sowohl das Winkelkriterium für Triangulationslinien ($9,5^\circ$), als auch das Abstandskriterium, weshalb er als Gruppenbestandteil ausgewählt wurde. Beim südlichen ist das Winkelkriterium ($5,4^\circ$) deutlich besser erfüllt und der erforderte Abstand ist nur um 2 Prozentpunkte zu groß (2,49 m zu 2,20 m). Aufgrund der Verfüllungsrichtung könnte aber der südliche anstatt des nördlichen Schachtes zur Gruppe gehören.

Die Gruppe L 21 (glutrot) ist die einzige, bei der die Verfüllungsachsen einer Gruppenbildung entgegenstehen. Allerdings sind hier Winkel- und Abstandskriterium beinahe perfekt erfüllt (Winkel 3° , Streckendifferenz 0,01 m).

Hier wird deshalb dem qualitativ höherwertigen Argument der geographischen Methode gefolgt. Im südwestlichen Flächenteil liegen bei den linearen Gruppen L 02 (zartrosa), L 03 (hell ocker), L 09 (hellrot), L 15 (ziegelrot), L 16 (ockergelb) und L 17 (dunkles orange) unerwartete Konstellationen vor. Die Übereinstimmungen bezüglich der Ausrichtungen zwischen L 03 und L 09 sowie den sie umgebenden Gruppen zeigen, dass hier die Verfüllungsstrukturen nicht im Widerspruch zur Gruppenbildung stehen.

Die Untersuchung der Verfüllungsachsen erlaubt es sogar, ein *Schema der Verfüllungsabfolge* bei einigen Gruppen zu entwerfen. Bei sechs Gruppen liegen Konstellationen vor, die nicht nur die Gruppenbildung bestätigen, sondern sich auch noch stark ähneln (L 05 hellgelb, L 06 hellrot, L 07 ockerfarben, L 12 hellrot, L 18 rot, L 20 hellbraun).

Die Verfüllungsachsen jeweils eines End- und/oder des Zentrumsschachtes passen gut zur Gruppenachse, während die Verfüllungsachse des anderen Endschachtes etwa auf 90° zur Gruppenachse dreht. Da für den letzten Schacht kein neuer Aushub mehr vorhanden war, musste für seine Verfüllung auf die Abrauhügel älterer Aktivitäten zurückgegriffen werden. Nach den Erfahrungen des Kiesgrubenbetriebes nimmt beim maschinellen Versetzen des Abraums dessen Volumen durch Entdichtung ca. um ein Siebtel und maximal um ein Fünftel zu. Bei manueller Verlagerung dürfte der Volumenzugewinn wegen geringerer Krafteinwirkung und geringerem Lastendruck beim Verkippen dem Maximalwert nahegekommen sein. Es blieb also trotz der sofortigen Verfüllung des jeweils aufgegebenen Schachtes immer etwas Material vom Aushub des neuen übrig. Dieser Versatz wurde vermutlich obertägig zu (kleinen) Abrauhügeln aufgeschüttet. Das "Restmaterial" älterer Aktivitäten bot sich nun als Verfüllung für den jeweils letzten Schacht einer Gruppe an. Bei solch einem Verfahren sollte dieser letzte Schacht eine Verfüllungsachse aufweisen, die auf die vorhergehende Abbaufont weist und somit ungefähr rechtwinklig zur Gruppenachse liegt. Auf diese Art entstand eine Konstellation, bei der die Verfüllungsachse des einen Endschachtes merkwürdigerweise senkrecht zur Gruppenachse liegt.

Folgt man diesem Modell, kann zusätzlich die gruppeninterne Schachtabfolge bzw. Abbaurichtung ermittelt werden. L 05 (hellgelb) wurde demnach von Ost nach West vorgetrieben, L 06 (hellrot) von West nach Ost, L 07 (ockerfarben) von West nach Ost, L 12 (hellrot) von Ost nach West, L 18 (rot) von Ost nach West und L 20 (hellbraun) von Südwest nach Nordost. Rechnet man die Konstellation bei L 14 (orange), wo die nördlichste Verfüllungsachse rechtwinklig zu den beiden anderen liegt, hinzu, so ergibt sich auch hier ein Hinweis auf den Vortrieb. Er dürfte von Südwest nach Nordost erfolgt sein. Im Fall von L 08 (helles orange) beziehen sich die Verfüllungsachsen alle aufeinander, lassen aber keine Abfolge erkennen.

Bei L 10 (gelb) wurde bereits durch die archäologische Situation klar, dass hier zuerst der westliche und dann der östliche Schacht angelegt wurde (s. o.).

Um *Zusammenhängen zwischen Gruppen* nachzuspüren, wird abschließend die Lage und Ausrichtung der Gruppen mit der Verteilung sechsseitiger Thiessenpolygone verglichen (**Abb. 2.38**).

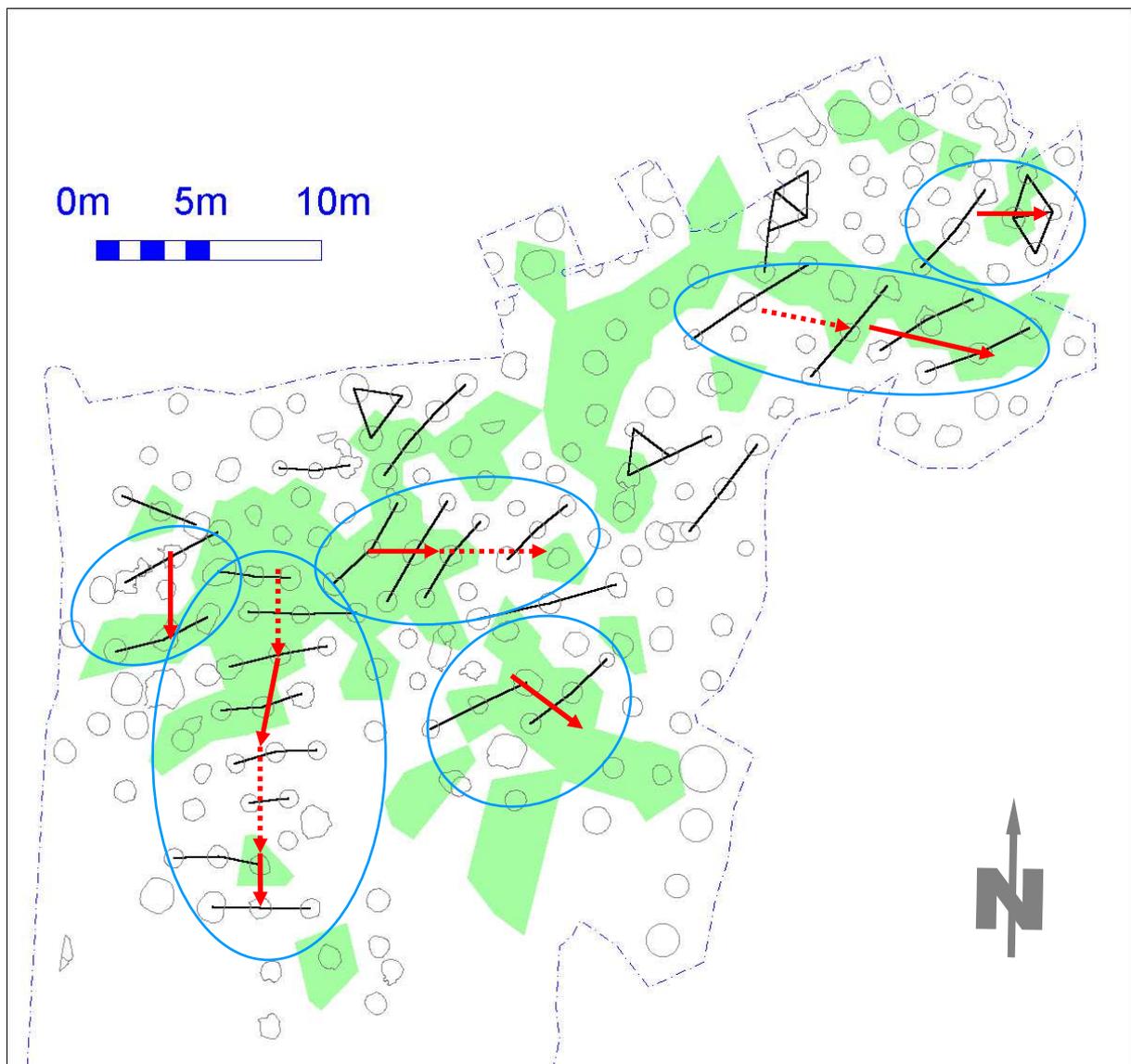


Abb. 2.38: Abensberg-Arnhofen. Schachtgruppen im Bereich der Kiesgrube und ihr Bezug zur Lage sechsseitiger Thiessenpolygone (grüne Flächen). Die nach Lage, Ausrichtung und Regelabstand zusammengehörenden Gruppen, die sog. Verbände, sind mit blauen Ellipsen markiert und mit Großbuchstaben durchnummeriert. Die Abbaurichtung wird von roten Pfeilen markiert. Bei unsicheren Verbindungen (s. o. Kap. 2.1.5.) ist die erschlossene Ausbreitungsrichtung des Bergbaus mit gestrichelten Pfeilen angedeutet.

Dabei sind vier *Kriterien* zu überprüfen (s. o. Kap. 2.1.5.), anhand derer eventuelle Zusammenhänge zwischen Gruppen aufgespürt werden können.

Der erste Schritt ist die Überprüfung des Winkels zwischen den einzelnen Gruppenachsen. Dafür wurden mit einer Zeichensoftware die Schächte an den Gruppenenden verbunden (nicht dargestellt) und die Winkel zwischen diesen Verbindungslinien elektronisch gemessen. Das zweite Kriterium "Ausrichtung in einer Flucht" – d. h. die Endschächte liegen annähernd in einer Reihe hintereinander – kann anhand der Gruppenkartierung einfach auf dem Plan überprüft werden. Um herauszufinden, ob benachbarte Gruppen den gleichen Regelabstand besitzen, musste noch einmal auf den detaillierten, "per Hand" durchgeführten Vergleich der Streckenlängen zurückgegriffen werden. Die Kartierung der sechsseitigen Thiessenpolygone erfolgte schließlich mit der GIS-Software, nachdem die Datengrundlage um die entsprechende Information erweitert wurde.

Die gleichmäßigen *Thiessenpolygone* verweisen auf größere Areale, bei denen die Anlage neuer Schächte die jeweiligen Vorgänger optimal mit einbezog. Es zeigen sich aber auch deutliche Lücken zwischen diesen Flächen.

Drei zusammenhängende Areale fallen durch ihre Größe auf. Im Nordwesten liegt das größte mit 125,9 m². Es umfasst insgesamt 35 Thiessenpolygone, hier auch Schachtflächen genannt. Einige davon sind nur noch durch einen weiteren Schacht vom Rand der Untersuchungsfläche getrennt. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass sich dieser große Bereich noch weiter in nicht untersuchte Areale ausdehnt^{2.10}. Unmittelbar südöstlich schließt sich ein weiteres, kleineres Areal aus 9 zusammenhängenden sechsseitigen Thiessenpolygone von 57,97 m² an. Da auch dieses im Osten an die Grabungsgrenze stößt, könnte seine Fläche ebenfalls noch größer sein. Das gleiche gilt für das mit 106,78 m² zweitgrößte Areal im Nordosten, das aus 20 Schachtflächen besteht.

Ein Optimist würde beim Blick auf die Karte ohne Beachtung der *Gruppierungskriterien* für die Schachtverbände bereits zahlreiche Schachtgruppen zusammenfassen. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass dann in kaum einem Fall die Kriterien erfüllt wären. Die rein theoretisch formulierten Kriterienwerte besitzen demnach zu wenig Spielraum für den Anwendungsfall. Auf eine vollständige Erfüllung der Anforderungen wurde bei der Zusammenfassung von Gruppen daher im Folgenden verzichtet. Stattdessen gilt bei der Erfüllung von drei Kriterien eine Zusammengehörigkeit von Schachtgruppen als wahrscheinlich. In keinem Fall wurde jedoch auf das Winkelkriterium (< 25°) verzichtet, da seine Einhaltung den wichtigsten Hinweis auf die Kenntnis um den genauen Verlauf der Abbaufrent darstellt.

^{2.10} Wenn Thiessenpolygone am Rand der Untersuchungsfläche liegen, kann die Anzahl ihrer Seiten nicht ermittelt werden, da ja keine Informationen über Art und Lage der nächsten Nachbarn jenseits der Grabungsgrenze vorliegen.

Zusammenschlüsse, die auf schwächeren Indizien beruhen, und deshalb als unsichere Verbindungen gelten, wurden extra hervorgehoben.

Es wurden insgesamt 23 Gruppen zu sechs *Schachtverbänden* zusammengefasst. Da ein Verband die fortgesetzte Anlehnung an bisherige Abbaumuster belegt, kann man die Verbände auch als Traditionsflächen bezeichnen. Zur Orientierung wurden die Schachtverbände mit Großbuchstaben bezeichnet, deren Reihenfolge sich an der Numerierung der linearen Gruppen orientiert. Die Größe der Verbände variiert stark. Drei (A, D und E) umfassen nur zwei Schachtgruppen. Bei den anderen konnten zweimal vier (C und F) und einmal sogar acht Schachtgruppen (B) zusammengefasst werden. Acht weitere Schachtgruppen ließen sich nirgendwo anschließen. Das betrifft die linearen Gruppen L 01 im Nordwesten, L 04 und L 13 im Norden, L 18 im Zentrum und L 21 am Ostrand, sowie um die polygonen Gruppen P 01 am Nordrand, P 02 nahe dem Ostrand und P 03 am östlichen Nordrand.

Um die *Bildung der Verbände* nachvollziehbar zu gestalten, wird im Folgenden erläutert, welche Kriterien im Einzelnen erfüllt sind.

Verband A am Westrand der Fläche besteht aus den beiden linearen Gruppen L 02 und L 03. Hier sind alle Kriterien erfüllt. Zwischen die beiden Gruppen ist jedoch ein einzelner Schacht so eingeschoben, dass sie sich nur im Südwesten als direkte Nachbarn berühren. Man kann allerdings die genaue Kenntnis um die Lage aller Vorgängerschächte sowohl indirekt über die Fläche von L 05, als auch direkt anhand der sechsseitigen Thiessenpolygone von L 02 belegen.

Der nächste *Schachtverband (B)* bildet ein beeindruckendes Ensemble. Ihm gehören acht lineare Gruppen an (L 05 bis L 12). Er erstreckt sich vom nordwestlichen Zentrum der Untersuchungsfläche bis fast zum Südrand des Bergwerkes. Zwischen allen Nachbarn ist das Winkelkriterium erfüllt. Bei der Sukzession von der Zweiergruppe L 10 zur Dreiergruppe L 11 ist allerdings die Flucht der zweiten Gruppe zu weit verschoben. Dies könnte allerdings von der Abbausituation am Rand des Bergwerkes bedingt sein. Möglicherweise versuchte man einer Abnahme der Ausbeute durch eine versetzt angelegte Gruppe zu entgehen. Beim östlichen Schacht von L 10 hatten die Bergleute vermutlich schon eine verringerte Ausbeute erhalten (s. o.). Die nächste Gruppe, so könnte man annehmen, wurde deshalb in die Nähe des ertragreichen westlichen Schachtes von L 10 gerückt. Folgt man dieser Interpretation, dann lässt sich das oben bei L 10 skizzierte Bild noch erweitern. Man dachte sogar noch nach einer Saison an die Bergbau-Informationen, die man bei dieser Aktivität gewonnen hatte. Demnach zeichneten sich die Verbände nicht nur durch eine Fortführung der Planungstradition aus, sondern es wurde auch das weitere bergbautechnische Wissen von einer Saison zur nächsten tradiert.

Beim Verband B ist noch ein Problem zu erwähnen. Zwischen den Gruppen L 05 und L 06 ist das Kriterium des gleichen Regelabstandes verletzt. L 05 weist auch den kleinsten internen Regelabstand aller Gruppen auf. Dies könnte daher rühren, dass L 05 in dieser Region hoher Rohmaterialausbeute (s. u. Kap. 2.3.) noch zwischen die bereits bestehenden Nachbargruppen links und rechts "hineingezwängt" werden sollte. Dagegen scheint bei L 06 wieder genug Platz zur Verfügung gestanden zu haben, um ein bevorzugtes Abstandsmaß umzusetzen. Die restlichen Gruppen des Schachtverbandes erfüllen beim Vergleich zwischen Nachbarn das Regelabstandskriterium. Eine letzte Anmerkung betrifft die sechsseitigen Thiessenpolygone. Ihre Verteilung setzt bei den Gruppen L 09 und L 10 aus. Das lässt sich mit der Randlage nahe der von Süden herein ziehenden Lücke in der Schachtverteilung zu erklären. Beide Gruppen grenzen mit ihrem Ostende an diese Lücke. Zudem umfasst L 10 ja nur zwei Schächte. Bei solch einer Konstellation ergibt sich weder eine sechsseitige Anordnung von Triangulationslinien noch ein hexagones Thiessenpolygon. Folglich setzen die entsprechenden Polygone bei der Sequenz L 09 – L 10 – L 11 auch aus. Die beiden Gruppen L 09 und L 10 sind sowohl in Bezug auf die Lage, als auch auf ihre Größe Sonderfälle und das führt zum Aussetzen der regelmäßigen Thiessenpolygone. Da L 12 die letzte Gruppe des Verbandes ist und zudem unmittelbar am Bergwerksrand liegt, kann hier gar kein derartiges Polygon entstehen.

Der *Verband C* zählt mit 4 Schachtgruppen (L 14 bis L 17) ebenfalls zu den größeren Traditionsflächen. Hier sind zwei Probleme zu erwähnen. Die Enden der Gruppen L 16 und L 17 sind so weit gegeneinander versetzt, dass sie nicht mehr als "um einen halben Schachtabstand verschoben" angesehen werden können. Zusammen mit dem Umbiegen der Ausbreitungsrichtung bei der südlich anschließenden Gruppe L 18 könnte zum Aussetzen der regelmäßigen Thiessenpolygone geführt haben. Die Einbeziehung von L 17 in den Verband C ist daher als fraglich anzusehen. Das andere Problem betrifft das Abstandskriterium. Die nördliche Triangulationslinie der Gruppe L 16 ist um 24 cm bzw. 9 Prozentpunkte und die südliche Triangulationslinie um 6 cm bzw. 2 Prozentpunkte zu kurz, um diese Anforderung zu erfüllen.

Da der *Verband D* nur aus zwei Gruppen (L 19 und L 20) besteht, ist nicht klar ob die starke Verschiebung der Gruppenenden gegeneinander als Verletzung des Anordnungskriteriums anzusehen ist. Es ist nämlich auch denkbar, dass die Anordnung aus dem Versuch resultierte, die Gruppen jeweils so nah wie möglich an einer nördlich von ihnen verlaufenden Abbaufrent anzulegen. Die große Fläche aneinandergrenzender sechsseitiger Thiessenpolygone belegt hier eine sehr gute Kenntnis der Position aller benachbarter Schächte.

Der *Verband E* aus L 26 und P 04 erfüllt beinahe alle Anforderungen. Ob allerdings beide Gruppen wirklich nur um einen halben Schachtabstand gegeneinander verschoben sind, ist wegen der Randlage von P 04 nicht überprüfbar.

Schließlich liegt mit dem *Verband F* wieder eine größere Traditionsfläche vor. Sie umfasst nur lineare Gruppen (L 22 bis L 25). Als einziges Problem ist hier der Einschub von drei Schächten, die nicht zu Gruppen zusammengefasst werden konnten, zwischen den Gruppen L 22 und L 23 zu vermerken. Allerdings sind trotzdem die Anforderungen an Ausrichtung, Anordnung und Abstandsmaße erfüllt. Ein zusammenhängender Streifen von regelmäßigen Thiessenpolygonen, der außerdem noch genau in der Flucht von L 23 bis L 25 liegt, verbindet L 22 mit dem Rest von Verband F.

In vier von sechs Fällen erfolgte die *Erweiterung der Schachtverbände* (C bis F) etwa von West-Nord-West nach Ost-Süd-Ost. Eine Strategie, bei der man mit neuen Schachtgruppen möglichst nahe an die vorhergehende Abbaufont rückte, erklärt Lage und Bezug der Schachtverbände. Begann man jeweils im Nordwesten – näher am Bergwerkszentrum – mit dem Abbau, verlief die zur Orientierung benutzte Abbaufont vermutlich West-Ost. Die Ausrichtung der hier diskutierten Verbände läge dann etwa parallel zur dieser alten Abbaufont. Die Achsen der einzelnen Gruppen sind dagegen eher Nordost-Südwest und damit diagonal sowohl zur Vorverlegung des Abbaues innerhalb der Verbände, als auch zum Verlauf der den Verbänden jeweils nördlich vorausgehenden Abbaufonten orientiert. Durch diese Ausrichtung der einzelnen Schachtgruppen kamen der mittlere und der südliche Schacht einer Gruppe wesentlich näher an der alten Abbaufont zu liegen, als wenn man die Achse der Gruppe Nord-Süd und damit senkrecht zur nördlich gelegenen alten Abbaufont gelegt hätte. So konnte man das Wissen aus den letzten jeweils zuvor angelegten Schächten optimal Nutzen. Blickt man in Richtung der Vorverlegung, dann sind die Areale “links“ und “im Rücken“ der neuen Gruppe schon bekannt. Diese Art der Ausbreitung lässt sich am besten mit den archäologischen Erkenntnissen zur Zweiergruppe L 10 (s. o.) verbinden.

Die implizite *zeitliche Abfolge* der Verbände C bis F ergibt als großräumigen Trend für den Abbau in der Nordhälfte der Untersuchungsfläche jeweils annähernd parallele Streifen von West nach Ost. Dies garantierte maximale Ähnlichkeit der bergbau-geologischen Situation zwischen bekannter und neuer Abbaufäche. Im Fall der Verbände E und F zeigt sich dieses Phänomen besonders deutlich. Damit repräsentieren diese Traditionsflächen eine relativchronologische Abfolge der Abbauaktivitäten im Bereich der Kiesgrube. Die beiden Verbände im Südwesten (A und B) fügen sich nicht hier ein, sondern belegen demgegenüber ein anderes Vorgehen.

Ihre Erweiterung erfolgte von Nord nach Süd. Hier ist besonders der Verband B interessant, bei dem der Abbau über eine Strecke von 16 m siebenmal nach Süden vorverlegt wurde. Hierin könnte sich eine andere, chronologisch bedingte Abbaustrategie manifestieren als bei den Verbänden C bis F. Aber auch eine Grenze des Kontrollbereiches zweier Gruppen von Bergleuten wäre denkbar, bei dem von der einen Gruppe (Verbände A und B) die Abbaufonten jeweils nach Süden vorverlegt wurden, bis das Flöz aussetzte, während die andere Gruppe von Bergleuten das oben beschriebene Muster praktizierte und dabei innerhalb ihres "Claims" mit der ersten Schachtgruppe eines Verbandes immer im Westen nahe einer Grenze zwischen den beiden Arealen begann.

Das *Arrangement von Schachtgruppen* in größeren Einheiten hat aus theoretischer Sicht eine bedeutende Konsequenz. Die Schachtgruppen sind das Ergebnis kurzfristiger Planung bzw. einer einfachen Lokalisierungsstrategie für eine konkrete Bergbauaktivität innerhalb einer Saison. Ihre Anordnung in Schachtverbänden belegt einen gewissen Einfluss einer komplexen Lokalisierungsstrategie. Die über große Teile der Ausgrabungsfläche durchgehaltene Orientierung der Schachtverbände verrät schließlich lange währende Traditionen bei der Planung des Abbaus (vgl. o. 2.1.4.). Die Kombination dieser Planungsebenen lässt sich nach Sack mit einem interessanten Aspekt der Raumnutzung verbinden (ders. 1986, 33ff. spez. 35 Fig. 2.1.). Danach wird durch den Nachweis der Planung zugleich die *Existenz von eingeschränkten Nutzungsrechten* im frühen Jungneolithikum hochwahrscheinlich.

An dieser Stelle ist es angebracht, weitere Punkte der *Abbauorganisation* zu erörtern. Der maximale zeitliche Abstand zwischen der Anlage zweier Gruppen kann nach allen Umständen wohl kaum mehr als eine Generation (ca. 25 bis 30 Jahre) betragen haben. Die Kenntnisse um Vorgängergruppen und alte Abbaufonten machen eine wesentlich geringere Zeitspanne im Bereich von einem bis wenigen Jahren wahrscheinlich. Das Anlegen von mehreren Gruppen eines Verbandes pro Jahr ist dagegen eher unwahrscheinlich. Dann hätte man nämlich auch gleich weitere Schächte in dieser Gruppe anstatt einer neuen Gruppe anlegen können. Hier sei auf die polygonen Gruppen mit vier Schächten (P 02 bis P 04, Halde P 01 bis P 04) und die beiden "übergroßen" linearen Gruppen (L 13, Halde L 13 s. u. 2.1.7. Abb. 2.39) hingewiesen, die möglicherweise aus dem Wunsch nach weiteren Schächten während einer Abbauaktivität resultierten.

Die bisherigen Ergebnisse lassen nur vage Vermutungen zur *Anzahl der Menschen* zu, die an einer neolithischen Abbauaktivität beteiligt waren. Die Mindestzahl von Personen, die an der Anlage eines Schachtes beteiligt sein musste, beträgt aus zwingenden arbeitstechnischen Gründen zwei.

Ein Bergmann treibt den Abbau auf der Schachtsohle voran und einer auf der Oberfläche fördert den gelockerten Abraum und den gewonnenen Hornstein. Mehrere Gründe sprechen aber dafür, dass die Anzahl der Beteiligten größer war. So ist die zu vermutende Seilförderung der zeitraubendste Bestandteil des Abbaus, denn das Lösen von Kies und Sand an der Schachtsohle kann wesentlich schneller erfolgen als sein Abtransport nach oben. Durch den Einsatz einer zweiten Person an einer zusätzlichen Seilförderung ließ sich wesentlich schneller fördern. Eine Befahrung mittels massiven Steighilfen (Steigbaum oder Leiter) dürfte in den engen Schächten zu Platzproblemen geführt haben. Außerdem würden die Kies- und Sandwände unter der lokalen Belastung Einbrechen. Geht man also von einer Seilfahrt aus, ist Folgendes zu bemerken. Der Bergmann auf der Schachtsohle musste bei Notfällen schnell nach oben gezogen werden, und dafür ist mindestens eine zweite Person an der Oberfläche nötig, wenn nicht sogar noch weitere. Bei drei oder mehr an der Oberfläche aktiven Personen wäre bei einem normalen Betrieb jeweils mindestens einer untätig geblieben. Man kann sich hier zwar auch eine Art Schichtwechsel vorstellen, bei der die Förderer jeweils nach einer gewissen Zeit von ihrer anstrengenden Arbeit abgelöst wurden. Dies wäre aber auch schon bei zwei Personen auf der Rasensohle möglich gewesen. Somit ergeben sich drei Personen als plausibelste Größe für ein Bergarbeiterteam. Einer führte den Vortrieb im Untergrund durch und zwei wechselten sich an der Seilförderung ab. Dass eine solche Gruppengröße ausreicht, zeigt ein Vergleich mit afrikanischen Brunnen (BURGEAP 1992, 46ff.). Beim Bau von Brunnen in traditioneller Bauweise, wie er bis in die Gegenwart im Tschad betrieben wird, sind nur drei bis vier Personen aktiv. Ein Spezialist, der sich mit dem Vorgehen auskennt, leitet zwei oder drei Hilfskräfte an. Die Brunnen sind ebenfalls senkrechte Röhren von 0,8 m bis 1,0 m Durchmesser.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Häufigkeit der Schachtgruppen aus drei Schächten. Von den 26 linearen Gruppen umfassen 24 drei Schächte. Für eine Schachtzahl, die der wahrscheinlichen Anzahl der Beteiligten entsprach, ist vor allem eine Erklärung zu nennen. Wenn diese Zahl der Anzahl der Angehörigen des Teams entsprach, konnte die an Risiko reichere Arbeit an der Schachtsohle gerecht auf die Beteiligten verteilt werden, indem jeder einmal auf der Sohle arbeitete. Verbindet man die Schachtzahl pro Schachtgruppe mit der Zahl der beteiligten Bergleute, so ergibt sich auch eine Erklärung für die großen Schachtgruppen von fünf Schächten. Diese Zahl liegt denn noch in einem Größenbereich, der als Umfang einer Arbeitsgruppe gerade Sinn macht, wenn kurze Schichten und Pausen einkalkuliert werden.

Anfang der 1990er Jahre schätzte Binstener die *Arbeitszeit pro Schacht* bei einer Teamgröße von zwei Personen auf vier Wochen (320 h bei 2 Personen; ders. 1990, 31). Bereits ein kritischer Vergleich mit anderen bis dahin bekannten Arbeitszeitschätzungen zeigt (vgl. FELDER 1980), dass dieser enorm hohe Aufwand eine krasse Fehlkalkulation zurückgeht. So schätzte Felder (a. a. O., 123 Tab. 3), dass in Rijckholt 2 Arbeiter in 7 Tagen 4 m³ Volumen bewegten. Hierbei handelte es sich jedoch teilweise um massiven Kreidekalk, der erst aus dem Gesteinsverband heraus gebrochen werden musste. Für einen Schacht in Arnhofen wurden schätzungsweise maximal 10 m³ Volumen, wahrscheinlich aber wesentlich weniger, bewegt (s. u.). Selbst wenn man für den Vortrieb durch Fels die gleichen Werte ansetzt, wie für den durch Lockermaterial, hätte Binstener bei seiner Schätzung von maximal 18 Tagen ausgehen dürfen. Das Lockern und Fördern von Sand und Kies ist aber wesentlich einfacher als das von Kreidekalkstein, weshalb auch von einem mehrfachen der Tagesfördermenge auszugehen ist. Die Schätzung Binsteners ist demnach deutlich zu hoch gegriffen und daher abzulehnen.

Glücklicherweise stehen mittlerweile nicht nur theoretische Schätzungen sondern auch praktische Erkenntnisse zum (Aus-)Graben eines Schachtes zur Verfügung. Bei Ausgrabungen im mittelneolithischen bis laténézeitlichen Hornsteinbergwerk von Krumlovsky les, östlich von Moravsky Krumlov, ca. 30 km südwestlich von Brno in Tschechien wurden neolithische Schächte von der Oberfläche bis zur Sohle ausgegraben^{2.11} (vgl. OLIVA 2006). Der Untergrund, in den man die Schächte grub, besteht wie die miozäne Schicht in Arnhofen aus Sanden. In Krumlovsky Les ist allerdings der Tongehalt und damit der Zusammenhalt des Sediments höher als in Arnhofen, was eine langsameren Vortrieb (!) zur Folge gehabt haben dürfte. Dort erzielte Erfahrungen zur Arbeitszeit können daher als sehr konservative Schätzung für die Situation in Arnhofen herangezogen werden. Im Sommer 2004 belief sich beispielsweise die Arbeitszeit für einen archäologischen Tiefschnitt von ca. 2,5 m Länge und ca. 1,5 m Breite bei etwa 8 m Tiefe, also einem Schnittvolumen von ungefähr 30 m³, auf ca. 15 Tage. Das pro Tag geförderte Volumen betrug damit etwa 2m³. Die Förderung während der Ausgrabung erfolgte mit Eimern an Seilen durch jeweils ein bis zwei Personen. Dies dürfte dem neolithischen Vorgehen sehr nahe kommen. Da die Seilförderung den zeitraubenderen Teil des Abbaus darstellt und das tonhaltigere Sediment schwerer abbaubar ist als das Arnhofener Lockergestein, kann der Vorteil von Metallwerkzeugen vernachlässigt werden.

^{2.11} Die Ausgrabung 2004 stand unter der Leitung von Herrn Dr. Martin Oliva, Anthropos Institut Brno. Herr Dr. Oliva führte mich im August 2004 über das Bergwerksareal, wobei ich die Ausgrabung eines mittelneolithischen Schachtes besichtigen konnte. Ihm sei an dieser Stelle herzlich für die Möglichkeit des Besuchs und die ausführliche Erläuterung seiner Erkenntnisse gedankt.

Zudem ist archäologisches Ausgraben wesentlich langsamer und sorgfältiger als eine einfache Materialförderung. Die Förderleistung der Ausgrabung kann man also gut auf das Neolithikum übertragen. Bei den Arnhofer Schächten ist von einem mittleren Durchmesser von ca. 1 m in 4 m Tiefe und einer Maximaltiefe von 8 m auszugehen. Es ergibt sich ein maximales (!) Fördervolumen ca. $6,25 \text{ m}^3$ pro Schacht ($8 \times 0,78 \text{ m}^2$ Schachtgrundfläche). Nach den oben beschriebenen Fördermengen ergäben sich 3,125 Tage Arbeitszeit ($6,25 \text{ m}^3 : 2 \text{ m}^3/\text{Tag} = 3,125 \text{ Tage}$) – aufgerundet 4 Tage pro Schacht bei einem Zweierteam. Bei dieser Geschwindigkeit konnte man eine Dreier-Schachtgruppe innerhalb von nicht einmal zwei Wochen angelegen! Da die meisten Schächte aber nur etwa 4 m bis 6 m tief waren, halbiert sich die Arbeitszeit für einen “flachen“ Schacht.

Die Schätzungen zu Personenzahl und Arbeitszeit sind besonders im Hinblick auf die Frage nach der *Arbeitsteilung* wichtig. Vorerst kann man feststellen: Die Größe der Schachtgruppen ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass es keinen kontinuierlichen Bergbau gab. Stattdessen führte man nach größeren Unterbrechungen immer wieder kleinere getrennte Aktivitäten durch. Trotz all der Kenntnisse und Fähigkeiten, die das Anlegen eines Schachtes erforderte, braucht man im Bergbau also keine professionellen Spezialisten anzunehmen. Der Bergbau in Arnhofen ist übrigens technisch nicht anspruchsvoller als der Bau eines mittelneolithischen Hauses mit über 5 m Höhe (LULEY 1992, 83ff.) oder die Anlage eines 13 m tiefen Brunnens (LEHMANN 1999, 302ff), wie sie aus dem Altneolithikum bekannt ist. In beiden Fällen kann man annehmen, dass erfahrene Dorfbewohner die Leitung des Bautrupps innehatten. Ganz ähnlich wird es sich auch in Arnhofen verhalten haben.

Eine Arbeitsgruppe im Bergbau bestand wahrscheinlich aus einem erfahrenen älteren Teilnehmer und ein bis zwei weiteren Arbeitskräften. Ein solcher Trupp konnte von jedem neolithischen Haushalt gestellt werden. Der Arbeitsaufwand für eine durchschnittliche Bergbauaktivität bewegte sich mit zwei Wochen in einer Größenordnung, die problemlos von einem neolithischen Haushalt zusätzlich zu den landwirtschaftlichen Tätigkeiten als saisonale Nebentätigkeit ausgeführt werden konnte. Da man sich im Prinzip die jungsteinzeitlichen Haushalte als Selbstversorgungslandwirte vorstellen kann, dürfte am ehesten eine Aktivität außerhalb der landwirtschaftlichen Saison in Frage kommen. Vielleicht ging man in der Region Arnhofen eben im Winter öfter einmal für einige Zeit ins Bergwerk, anstatt wie andere auf die Jagd. Jeder neolithische Haushalt aus der Umgebung des Bergwerks war vermutlich in Bezug auf Technik wie Arbeitskräfte prinzipiell in der Lage, selbst tätig zu werden. Allerdings zeigen Planung und Traditionsflächen deutlich, dass die Nutzung wohl nicht jedem offenstand.

Um die Frage nach der *Anzahl der Arbeitsgruppen* von der empirischen Seite zu beantworten, müsste man einen wesentlich größeren Ausschnitt der Bergwerksfläche auf die gleiche Weise untersuchen. Wie die Untersuchung zur Hornsteinverarbeitung im nächsten Kapitel (3.) noch zeigen wird, lässt sich aber die Zahl der potentiell berechtigten Haushalte auf die Anlieger aus den Siedlungen in der Bergwerksumgebung eingrenzen.

Beim Thema Arbeitsteilung ist es auch nötig, auf die hier tätigen *Arbeitskräfte* einzugehen, um keine unreflektierten oder gar anachronistische Vorstellungen – Stichwort “Kinderarbeit“ – aufkommen zu lassen. Angesichts vermeintlich unzureichender Schachtdurchmesser von unter einem Meter (Kiesgrube, Planum 4 bei ca. – 4 m: Median der Schachtdurchmesser 0,95 m; n = 136) könnte man voreilig darauf verfallen (vgl. BINSTEINER 2005, 66; BINSTEINER/ERNSTSON 2001), es handele sich um ein Anzeichen für den Einsatz von Kindern. Beschäftigt man sich aber mit Beobachtungen, die in verschiedenen Wissenschaften zu diesem Bereich gemacht wurden, gelangt man zu einem anderen Bild.

Beim bronzezeitlichen Kupferbergbau im südostisraelischen Wadi Arabah legte man beispielsweise über 14 m tiefe Schächte an, die durch massiven Sandstein gehauen werden mussten (CONRAD/ROTHENBERG 1980, 27ff.). Die Schachtdurchmesser liegen bei 0,7 m bis 0,9 m. Bei dieser Schwerstarbeit in Wüstenklima kann man getrost von erwachsenen Bergleuten ausgehen. Schließlich weiß man über die Zusammensetzung anderer ägyptischer Arbeitertrupps, die wahrscheinlich im Sinai Bergbau betrieben, gut Bescheid (EGGEBRECHT 1982, 65f.). In den Listen ist sogar ihre Verpflegung angegeben. Unter den Teilnehmer gibt es kein einziges Kind. Aber nicht nur der Vergleich mit (prä-)historischem Bergbau in anderen Regionen ist hier hilfreich, sondern auch der Blick auf das oben schon vorgestellte Beispiel des traditionellen afrikanischen Brunnenbaus (BURGEAP 1992, 47). Obwohl die Brunnen von erwachsenen Männern gegraben werden, sind sie einfache, senkrechte Röhren von nur 0,8 m bis 1,0 m Durchmesser. Dass diese vermeintliche Enge keine Behinderung für die erwachsenen Arbeiter darstellt, belegen Tiefen von bis zu 100 m (!) – im Durchschnitt liegen die Sohlen bei 30 m Tiefe.

Schließlich sollte, wer wegen der vermeintlichen Enge die Beschäftigung von Kindern annimmt, zuerst die prähistorische Anthropologie zu Rate ziehen. Nur so kann man überhaupt eine Vorstellung von den durchschnittlichen Größen der Erwachsenen gewinnen, aus denen sich die potentiellen Bergleute rekrutierten. Dafür genügt ein Blick auf die Körpergröße neolithischer Populationen aus Ostdeutschland (BACH 1978, 77 Tab. 40). Bandkeramische Männer (5500 v. Chr. bis 4950 v. Chr.) waren dort im Schnitt nur 166 cm groß (165,8 cm +/- 1,1), bandkeramische Frauen sogar nur etwa 156 cm (156,6 cm +/- 1,1).

Populationen des Spätneolithikums (Walternienburg/Bernburg: 3300 v. Chr. bis 2800 v. Chr.; vgl. MÜLLER 2001, 426 Abb. 261) waren auch nur unwesentlich größer (♂ 167,1 cm +/- 1,1; ♀ 157,0 cm +/- 0,9). Die niederbayerischen Neolithiker werden vermutlich ganz ähnliche Körpergrößen besessen haben.

Schachtdurchmesser von knapp 0,8 m in Arnhofen sind also kein zwingender Hinweis auf den Einsatz von Kindern^{2.12}. Damit wird nicht behauptet, dass beim Bergbau keine Kinder oder Jugendliche beteiligt waren. Wenn dies der Fall war, werden sie aber, wie in traditionellen Gesellschaften – und übrigens auch hierzulande in ländlichen Gegenden bis vor 60 Jahren – üblich, entsprechend ihren körperlichen Fähigkeiten als Hilfskräfte eingesetzt und für eigene zukünftige Aktivitäten eingelernt worden sein. Die Schwerstarbeit an den Schachtsohlen in Arnhofen konnte aber, wie die Beispiele aus der Bergbaugeschichte, der Ethnologie und der Anthropologie zeigen, sehr gut von Erwachsenen ausgeübt werden. Aussagen wie, aufgrund des Schachtdurchmessers sei der Bergbau “[...] *nur* mit dem Einsatz von Kindern im Schachtbau denkbar“ (BINSTEINER/ERNSTSON 2001; meine Hervorhebung), oder, “ein Erwachsener benötigt zum Abteufen eines senkrechten Schachtes gewiss mehr Platz“ (RIND 2000a, 39), besitzen keine argumentative Grundlage.

Die Schachtdurchmesser sind kein Argument gegen die Arbeit erwachsener neolithischer Bergleute oder für die Tätigkeit von Bergleuten mit kindlichen Körpermaßen. Wenn man aber überhaupt allein aus den Schachtdurchmessern einen Schluss auf die Körpergröße der Bergleute ziehen möchte, dann sprächen die Schachtmaße nach den oben vorgestellten Körpermaßen am ehesten für Frauenarbeit!

Das wirft die Frage nach dem *Geschlecht der Bergleute* auf. Eine jungsteinzeitliche Bauersfrau konnte sicher ebenso hart zupacken, wie ihre heutigen Kolleginnen. Die Härte der Arbeit ist also kein Argument gegen weibliche ‘Bergmänner’. Wenn in dieser Studie ohne Kommentar die Bezeichnung ‘Bergmann’ oder ‘Bergleute’ verwendet wird, so ist damit ausdrücklich keine implizite Antwort auf diese Frage gegeben – es handelt sich schlicht um den üblichen Sprachgebrauch.

^{2.12} Im Sommer 2001 wurden zwei Befunde in Negativtechnik ausgegraben. Es handelt sich um einen Schachthalsabschnitt von Obj. 179 mit etwa 0,8 m Durchmesser und den Weitungsansatz des Schachtes Nr. 115 nahe der Sohle, der anfangs nur etwa 1,0 m im Durchmesser maß. Den Halsabschnitt grub eine ca. 1,56 m große Mitarbeiterin der Kreisarchäologie aus, und bei der Weitung war eine Kölner Studentin von etwa 1,58 m Größe aktiv. Die Ausgräberinnen saßen dabei in den Befunden und konnten deren Verfüllungen problemlos mit feinsten Grabungstechnik entfernen, ohne an die Schachtwände anzustoßen! Damit ist quasi im Experiment bewiesen, dass erwachsene Personen von dieser Größe ohne weiteres einen Schacht in die Tiefe graben konnten.

Eine Reihe ethnographischer Analogien spricht zwar für eine (fast ausschließlich) von Männern ausgeführte Tätigkeit (DE GROOTH 1994, 106ff.). Jedoch wurden im Bergwerk von Krumlovsky Lés in Mähren zur Zeit der Lengyelkultur gleich zweimal Frauen in über 6 m Tiefe nahe der Sohle eines Schachtes bestattet (OLIVA 2006, 165f.). Zwar dokumentiert eine Bestattung keine Mitarbeit, andererseits belegt sie eine Beziehung auf einer überhöhten Ebene, die man durchaus sogar in den Bereich von Nutzungsrechten stellen kann. Je nachdem, welchen Analogieschluss man höher bewerten will, den ethnographischen oder den archäologischen, muss sich jede/-r diese Frage selbst beantworten.

Schließlich ist im Zusammenhang mit der Arbeitsteilung noch die Frage nach der *Abhängigkeit der Arbeitskräfte* im neolithischen Bergbau zu erörtern. Ein auf Sklaverei aufbauender Betrieb von Bergwerken ist vor dem Hintergrund neolithischer Gesellschaften schlicht abwegig. Es handelt sich um eine sozialhistorisch uninformierte Vorstellung, die ohne die Diskussion der sozialen Voraussetzungen für ein solches gesellschaftliches Verhältnis auskommt (zu den gesellschaftlichen Implikationen von Sklaverei vgl. MEILLASOUX 1989, bes. 37f., 68ff. und 289ff.). Damit wird nicht behauptet, es habe überhaupt keine rechtlosen und ökonomisch abhängigen Gesellschaftsangehörigen gegeben. Gerade die Existenz eines solchen Personenkreises zeichnet sich ja kaum in den materiellen Hinterlassenschaften einer Gesellschaft ab. Dass aber eine derartige soziale Gruppe – wenn es sie denn gab – im Neolithikum so zahlreich war, um eine gesellschaftlich notwendige Arbeit (überwiegend) durch sie verrichten zu lassen, ist hochgradig unwahrscheinlich. Solche Vorstellungen entspringen einem vulgär-evolutionistischen Diskurs, der sich die prähistorischen Verhältnisse aus einem Mangel an kultureller Reflexion unbewusst als eine Art ‘unterentwickelten’, gewalttätigen und inhumanen Gegenentwurf zu unserer vermeintlich humanen und ‘kulturell hochstehenden’ Gegenwart ausmalt. Mit solchen, leider allzu populären Vorschlägen wird man aber seiner Pflicht als kulturhistorisch arbeitender Wissenschaftler nicht gerecht. Die Antworten auf abstrakte historische Fragen verlangen eine offene und nachvollziehbare Argumentation. Zu diesen wichtigen Punkten nur suggestive Vermutungen zu äußern, ohne nach der kulturalanthropologisch Plausibilität zu fragen, reicht nicht aus.

Die bisherigen Überlegungen zur räumlichen Organisation haben gezeigt, wie fruchtbar ein geographisch-statistischer Ansatz auch für eine wirtschaftshistorische Fragestellung sein kann. Gerade das einfache Quantifizieren von Größen des prähistorischen Wirtschaftslebens ist grundlegend für die Beantwortung abstrakter Fragen wie etwa die nach der Arbeitsteilung. Im nächsten Abschnitt wird das hier eingeschlagene Vorgehen weitergeführt und auf die Schachtverteilung auf dem Haldenareal angewendet.

2.1.7. Schachtgruppen in der Haldengrabung

Auf der befundorientierten Ausgrabungsfläche Halde konnte durch die Umsetzung der oben vorgestellten Vorgehensweise zwar ebenfalls eine größere Anzahl an Schachtgruppen gebildet werden (**Abb. 2.39**), die Art der erfassten Befunde und die Ergebnisse der Punktfeldstatistik mahnen hier jedoch zur Vorsicht, was Quellengüte und Verallgemeinerbarkeit angeht.

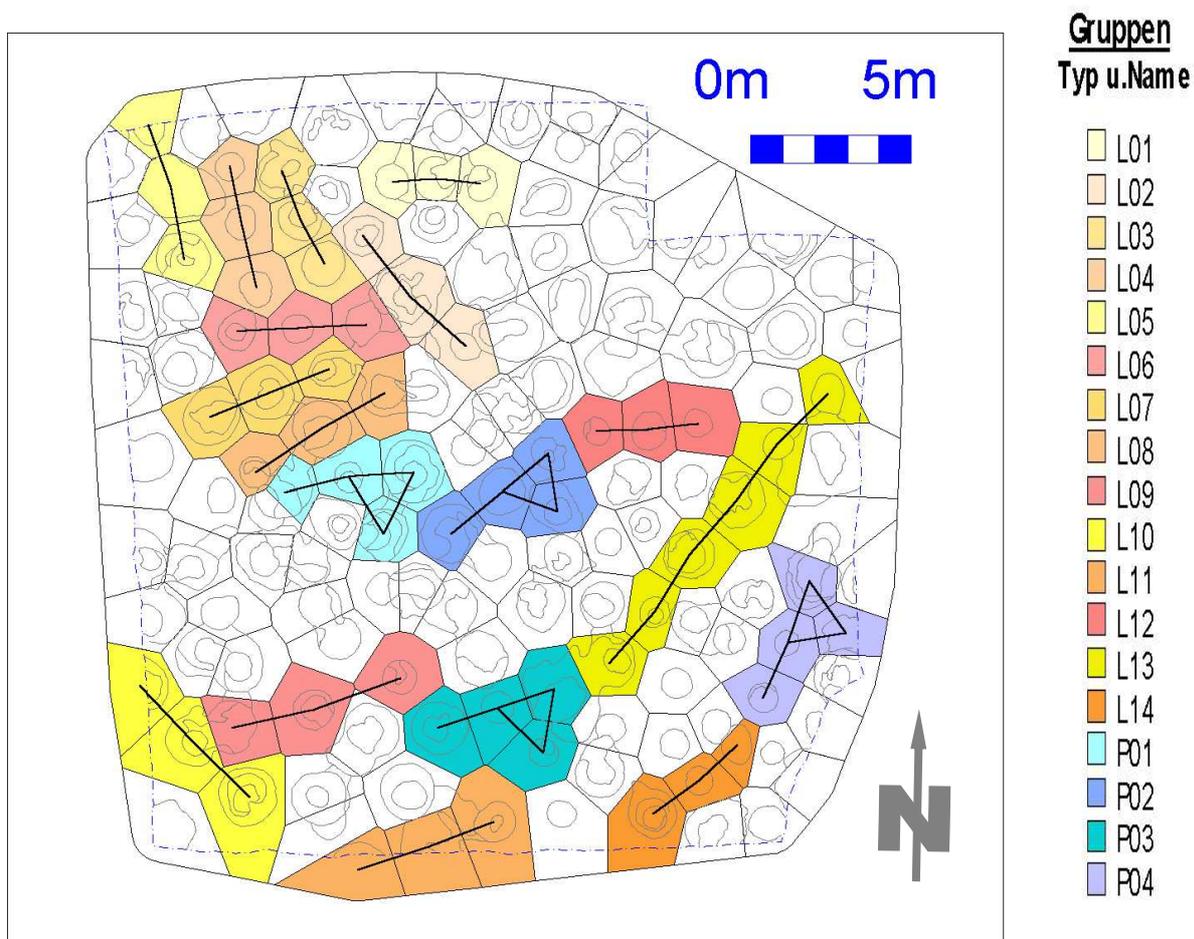


Abb. 2.39: Abensberg-Arnhofen. Schachtgruppen im Bereich der Haldengrabung. Die Schächte einer Gruppe sind mit den schwarz markierten Triangulationslinien verbunden. Die Thiessenpolygone der Schächte einer Gruppe sind gleich eingefärbt: lineare Gruppen in Gelb-, Rot- und Brauntönen, polygone Gruppen in Blautönen.

Die Konventionen für Darstellung und Bezeichnung gleichen weitgehend denen des vorangehenden Abschnitts. Nur bei der Numerierung der Gruppen treten leichte Unterschiede auf. Die Zählung beginnt bei beiden Gruppenarten wieder mit eins. Bei den linearen Gruppen setzt sie am zentralen Nordrand mit L 01 (hell gelb) ein und läuft zunächst nach Westen bis L 05 (hell gelb), um dann unmittelbar südlich der bereits nummerierten Gruppen mit L 06 (hell rot) fortgesetzt zu werden. Von hier geht es nach Süden weiter bis zu L 11 (orange) am Südrand.

Es folgt eine östliche Kolumne, die von L 12 (rot) im nordöstlichen Zentrum bis L 14 (dunkel orange) am östlichen Südrand reicht. Die polygonen Gruppen sind von Nordwest (P 01 hellblau) nach Südost (P 04 lila) durchnummeriert. Auch hier steht die Reihenfolge der Bezeichnung (zunächst) nicht für eine vermutete Abfolge der Schachtgruppen.

Es wurden insgesamt 18 *Gruppen* gebildet, 14 lineare und 4 polygone. Von den 153 Schächten, die in die Untersuchung des Haldenareals eingingen, wurden 61 (39,9 %) zu Gruppen zusammengefasst. Wiederum entfällt der weitaus größere Anteil (29,4 %) mit 45 Schächten auf die linearen Gruppen, während die polygonen Gruppen nur 16 Schächte (10,5 %) umfassen (n=153). Das Verhältnis von linearen zu polygonen Gruppen beträgt damit sowohl bei der Gruppenzahl wie bei den darin vereinten Schächten etwa drei zu eins. In der Kiesgrube liegen die Werte dieser Relationen mit 6,5 zu 1 bei den Gruppen und ca. 5 zu 1 bei den Schachtzahlen wesentlich höher.

Bei diesen Zahlenverhältnissen ist wie erwähnt Vorsicht geboten, da auf dem Planum des Haldenareals auch andere *Befunde* und nicht nur Schächte dokumentiert worden sein könnten. Die Schächte auf einem Niveau von nur 1,3 m unter der Oberfläche zu untersuchen, führte zu Problemen. Das Planum schnitt die meisten Schächte noch auf der Höhe der (leicht) trichterförmig erweiterten Schachtmünder. Bei den Schachtmündern kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass sie die Umrise eines in tieferen Plana kreisrunden Schachtes konzentrisch umschließen. Dies trifft selbst dann zu, wenn die Schachtmündung kreisrund ist. Diese dürfte nämlich bei der Verfüllung durch das Hineinwerfen und Hineinschieben des Versatzes besonders stark beschädigt worden sein. Das betraf vor allem die Wände und die Kante zwischen Schachtröhre und Oberfläche. Vermutlich brachen dabei auch kleinere und größere Partien vom Rand des Schachtes ab. Wird ein Schacht auf dem Niveau dieser exzentrischen Ausbrüche geschnitten, ist nicht klar, welcher Teil seines Umrisses am stärksten betroffen ist. Dieses unregelmäßige Ausfransen des Schachtmundes führte somit zu größeren Ungenauigkeiten, als sie bei der Ermittlung des Schachtmittelpunktes auf dem Niveau des Schachthalses auftraten. Auch können postneolithische pedologische Prozesse (Bleichung, Kornsortierung), die unmittelbare Umgebung der Schachtmünder so verändert haben, dass umgebende Flächenausschnitte irrtümlicherweise noch den Befunden zugeschlagen wurden. Das führte zu einer weiteren Unsicherheit bei der Ermittlung des Mittelpunktes. Damit, und mit den durch die punktfeld-statistischen Analysen erkannten Störungen kann man erklären, weshalb der Anteil von Schächten, die sich zu Gruppen zusammenschließen lassen, mit 39,9 % auf dem Areal der Halde etwas niedriger ist als die 41,4 % in der Kiesgrube.

Die *linearen Gruppen* sind auf dem Haldenareal nicht so deutlich in der Überzahl, wie in der Kiesgrube. Aber auch hier sind drei Schächte pro linearer Gruppe der Regelfall. Nur einmal (L 13, intensiv gelb) ließen sich sechs Schächte zusammengruppierten. Als zahlreichere Variante werden sie aber auch häufiger von den beschriebenen Störfaktoren betroffen, was ihre Zahl wieder vermindert.

Die vier *polygonen Gruppen* bestehen alle aus vier Schächten. Diese vier sind auch alle in der gleichen Weise über zwei "Schachtzeilen" verteilt. Die erste Zeile wird von einer linearen Dreieranordnung gebildet, während der vierte Schacht jeweils zwischen den östlicheren Schächten nach Südosten vorgeschoben wurde.

Wie auch in der Kiesgrube konnten nur selten Schächte vom Rand der Untersuchungsfläche in die Gruppenbildung einbezogen werden. Ausnahmen sind die linearen Gruppen L 10 (gelb) und L 11 (orange), deren zugehörige Thiessenpolygone alle an der Grabungsgrenze liegen.

Im Inneren der Halde erstrecken sich drei größere Areale und ein kleineres, auf denen keine Gruppenbildung möglich war ("Fehlstellen"). Das Erste zieht sich von der Einbuchtung in der Nordostecke nach Südwesten zum Zentrum der Haldenfläche hin. Das Zweite erstreckt sich vom Westrand als zunächst drei und später zwei Schächte breiter Streifen weit ins südliche Zentrum der Fläche. Parallel zu seinem Ostteil liegt in der Südostecke das dritte größere Areal ohne Schachtgruppen. Beide werden nur von der großen linearen Gruppe L 13 (intensiv gelb) getrennt. Die kleine, von Schachtgruppen freie Fläche nahe dem südwestlichen Rand umfasst nur vier Befunde.

Für die zwei nördlicheren der großen Flächen ist das gehäufte Auftreten *langgestreckter Thiessenpolygone* kennzeichnend. Streifenförmige Anordnungen dieser Art befinden sich unmittelbar nördlich von P 02 (himmelblau) und zwischen P 01 (hellblau) sowie L 09 (fahl rot). Sie entstehen, wenn die Datenpunkte (Schächte) in einer Achse besonders eng beieinander liegen, während die Abstände zu den senkrecht dazuliegenden Schächten wesentlich größer ausfallen. Eine Erklärung liefert die nachträgliche Anlage von Schächten in den zuvor frei gebliebenen Flächen zwischen den Schächten einer Gruppe, wenn z. B. "Nachzügler" ungefähr auf der Achse einer vorangegangenen Gruppen liegen. Auffällig hieran ist, dass die bergbau-technischen sinnvoller Zwickel im Dreieck zwischen drei Vorgängerschächten scheinbar nur selten benutzt wurden. Das spricht dafür, dass die Anlage derartiger Schächte erfolgte, als der geplante Abbau in dieser Fläche schon lange beendet war und man die Altschächte nicht mehr genau identifizieren konnte. Nach der Anzahl der langgestreckten Thiessenpolygone zu schließen, entspricht ihre Zahl etwa 5 % der Gesamtsumme (n=163). Das wäre ungefähr die Hälfte der "Störschächte", die aufgrund der punktfeldstatistischen Beobachtungen geschätzt wurde.

Für das Planum, das dieser Auswertung zugrunde liegt, wurde keine detaillierte Beschreibung der Verfüllung erstellt. Es ist daher *keine Aussage* zur *Verfüllungsrichtung* möglich, die mit der Kiesgrube vergleichbar wäre. Dies ist aber nicht als gravierender Erkenntnisverlust zu bewerten, da hier nur selten gut ansprechbare Strukturen in den Verfüllungen erkennbar waren. Auch sind die Binnenstrukturen der Verfüllungen längst nicht so deutlich, wie die Befundgrenzen, obwohl die Verwendung der gleichen Linienart im Plan etwas anderes suggeriert. Sie sind zudem häufig wesentlich schwächer voneinander abgegrenzt als die Verfüllungsstrukturen, die auf den Plana der Kiesgrube dokumentiert wurden. Viele Befunde, die auf dem Plan als Verbindungen zwischen Schächten erscheinen, sind nur schwach ausgeprägte Befunde. Deshalb wird hier darauf verzichtet, die wenigen deutlicheren Verfüllungsphänomene mit der Gruppenbildung in Bezug zu setzen. Für eine eindeutige Interpretation hätte es hier zahlreicher Profile bedurft. Alle potentiellen Schichtgrenze zwischen Verfüllungen in den Plan aufzunehmen war nötig, weil in einigen Fällen die Aufteilung eines Befundes in unterschiedliche Schächte erst durch den Verlauf von Außengrenzen und Binnenstrukturen nachvollziehbar wird.

Quellenkritisch anzumerken ist, dass *postsedimentäre Umbildungen* und Verlagerungen über Schächten, scheinbare Zusammenhänge suggerieren können (vgl. u. 2.2.). Die Anwesenheit der Schächte, die eine höhere Wasserdurchlässigkeit besitzen, als das auf dem Anstehenden aufliegende Haldenmaterial, kann sich zudem unterschiedlich auf die pedologischen Veränderungen der Haldenschichten ausgewirkt haben. Davon waren Teile der Halde in unmittelbarer Umgebung der Schächte ebenso betroffen wie die Schachtmünder. Sie setzten sich dadurch von den Haldenbereichen ab, die weiter von diesen 'Drainagen' entfernt lagen. Dabei ist zunächst auf die Bleichung hinzuweisen, die bei der nachneolithischen Bodenbildung besonders die oberen Haldenbereiche stark veränderte und weitgehend entfärbte. Über und neben den Schächten dürfte das veränderte Wasserabflussverhalten zur zusätzlichen Lösung und Auswaschung färbender Mineralanteile geführt haben. Dadurch sehen sich diese Haldenschichten und das Sediment in den Schachtmündern farblich sehr ähnlich. Aber auch Kornverlagerungsprozesse, bei denen Feinkornanteile mit dem versickernden Wasser aus den benachbarten Haldenschichten tiefer in die wasserdurchlässigeren Schächte gewaschen wurden, sind denkbar. Die postneolithischen Veränderungen der Haldenschichten können nachträglich verschiedene Schichten weitgehend einheitlich erscheinen lassen und oder Schichtgrenzen in der Halde vorspiegeln, während echte Grenzen durch die Angleichungsprozesse verlorengehen.

All diese Probleme haben größeren Einfluss auf die Ermittlung der Schachtmittelpunkte und damit auf das Ergebnis der Triangulation.

Diesen Störeffekten wird daher im Folgenden mit einer *Lockerung der Kriterien* für die Gruppenbildung begegnet (**Abb. 2.40**).

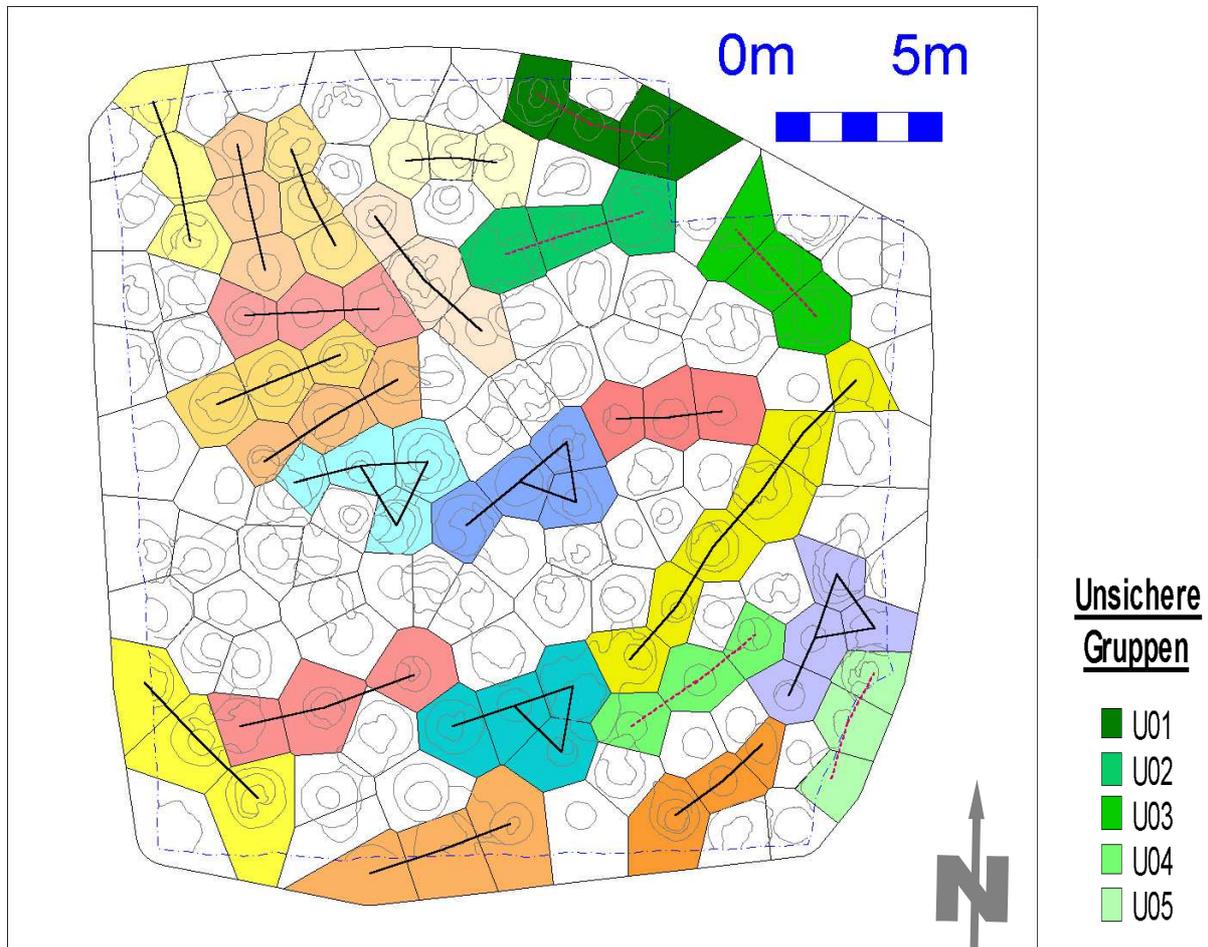


Abb. 2.40: Abensberg-Arnshofen. Schachtgruppen und unsichere Schachtgruppen im Bereich der Haldengrabung.

Die Schächte einer Gruppe sind mit den schwarz markierten Triangulationslinien verbunden. Die unsicheren Gruppen sind sie mit einer gestrichelten roten Linien gekennzeichnet. Die Thiessenpolygone aller Schächte einer Gruppe sind gleich eingefärbt: lineare Gruppen in roten, gelben und braunen Farbtönen, polygone Gruppen in Blautönen und unsichere Gruppen in Grüntönen (zur Bezeichnung der sicheren Gruppen s. o. Abb. 2.39).

Dafür wird in einem zweiten Durchgang die relative Längendifferenz, bei der zwei Triangulationslinien noch als gleich lang betrachtet werden, auf 15 % der längeren der beiden Strecken festgelegt. Das Winkelkriterium erfährt keine Veränderung, um die angewendete Methode nicht zu sehr aufzuweichen. Durch diesen Schritt lassen sich fünf weitere Gruppen bilden. Diese zusätzlichen Schachtgruppen erhielten das Kürzel "U" für unsicher und wurden von Nord (U 01 dunkelgrün) nach Süd (U 04 fahl grün) durchnummeriert. Sie erscheinen mit grün unterlegten Thiessenpolygonen. In allen Fällen handelt es sich um lineare Gruppen aus drei Schächten.

Zwar basiert die Bildung dieser Gruppen einer noch problematischeren Datenqualität, als die der anderen, mit Lage und Ausrichtung fügen sich die neuen Gruppen aber problemlos in das bisherige Bild ein (besonders U 04 / fahl grün und U 05 / hellgrün). Es werden daher alle Gruppen gemeinsam diskutiert.

Durch die fünf zusätzlichen, "unsicheren" Gruppen gleichen sich manche *Zahlenverhältnisse* zwischen Kiesgrube und Halde an. Das Verhältnis von Schachtgesamtzahl zu Gruppenanzahl kann auch als Gütemaß für den Erfolg der Gruppenbildung betrachtet werden. Es liegt in der Kiesgrube bei 7,5 (227 zu 30). In der Halde erreicht es jetzt 6,7 (153 zu 23). Vorher hatte es dort bei 9,1 gelegen. Auch das Verhältnis zwischen linearen und polygonen Gruppen erhöhte sich von 3,5 zu 1 auf 4,8 zu 1 und nähert sich etwas dem Verhältnis von 6,5 zu 1 in der Kiesgrube. Das Verhältnis zwischen der Anzahl der Schächte, die in linearen (45 bzw. 60) und solchen, die in polygonen Gruppen (16) vereint sind, steigt von 2,8 zu 1 auf 3,8 zu 1.

In die zusätzlichen Gruppen wurden überproportional viel randlich gelegene Schächte einbezogen. Acht von fünfzehn liegen an oder auf der Grabungsgrenze. Die Lockerung der Kriterien scheint hier besonders zu greifen. Von den Flächen ohne Schachtgruppen bleiben nur noch die zwei größeren Areale erhalten, in denen langgestreckte Thiessenpolygone auftreten. Das ist zum einen die Fläche südwestlich der Nordostecke und zum anderen der von Westen ins südliche Zentrum ziehende breite Streifen.

In den dichter besetzten Bereichen zeigen sich nun zwischen den Gruppen deutlich "*Leerstellen*", die sowohl einzelne Schächte (im Norden), als auch zwei bis drei Schächte umfassen (im Süden). Dadurch wird wahrscheinlich, dass der Abbau manchmal auch mit einzelnen Schächten bzw. Zweiergruppen, wie sie archäologisch in der Kiesgrube belegt sind, durchgeführt wurde. Lässt man einmal die Randbereiche und die größeren Areale im Nordosten und im südlichen Zentrum ohne Gruppen außer Acht, so scheint das Verhältnis zwischen den größeren Schachtgruppen und den einzeln oder in Zweiergruppen angelegten Schächten etwa 6 zu 1 (76 zu 12) zu betragen.

Eine *Zusammenschau der Gruppenbildung* erbringt folgende Zahlen. Die Beobachtungen auf den Flächen Halde und Kiesgrube legen nahe, dass Abbauaktivitäten normalerweise in einer Größenordnung von drei bis vier Schächten erfolgten. Dabei überwiegt die Variante mit drei Schächten deutlich. Von den insgesamt 53 Schachtgruppen auf den beiden Untersuchungsflächen sind 42 lineare Gruppen mit drei Schächten. Insgesamt wurden 170 der 380 einbezogenen Befunde einer Gruppe zugewiesen (44,7 %).

Schließt man alle Schächte mit Thiessenpolygonen, die entweder die Grabungs- oder die Untersuchungsgrenzen (identisch im Falle der Halde) berühren, von der Betrachtung aus, so stehen 273 Befunde gegen 139 Schächte, die sich Gruppen zuweisen lassen (50,9 %). Dabei wurden Schächte, die einer den Rand berührenden Gruppen angehören, dies selbst aber nicht tun, als gruppenzugehörige Schächte gezählt.

Bei der Suche nach *Schachtverbänden* auf dem Areal der Haldengrabung wurde in der gleichen Weise vorgegangen, wie auf der anderen Untersuchungsfläche (Abb. 2.41).

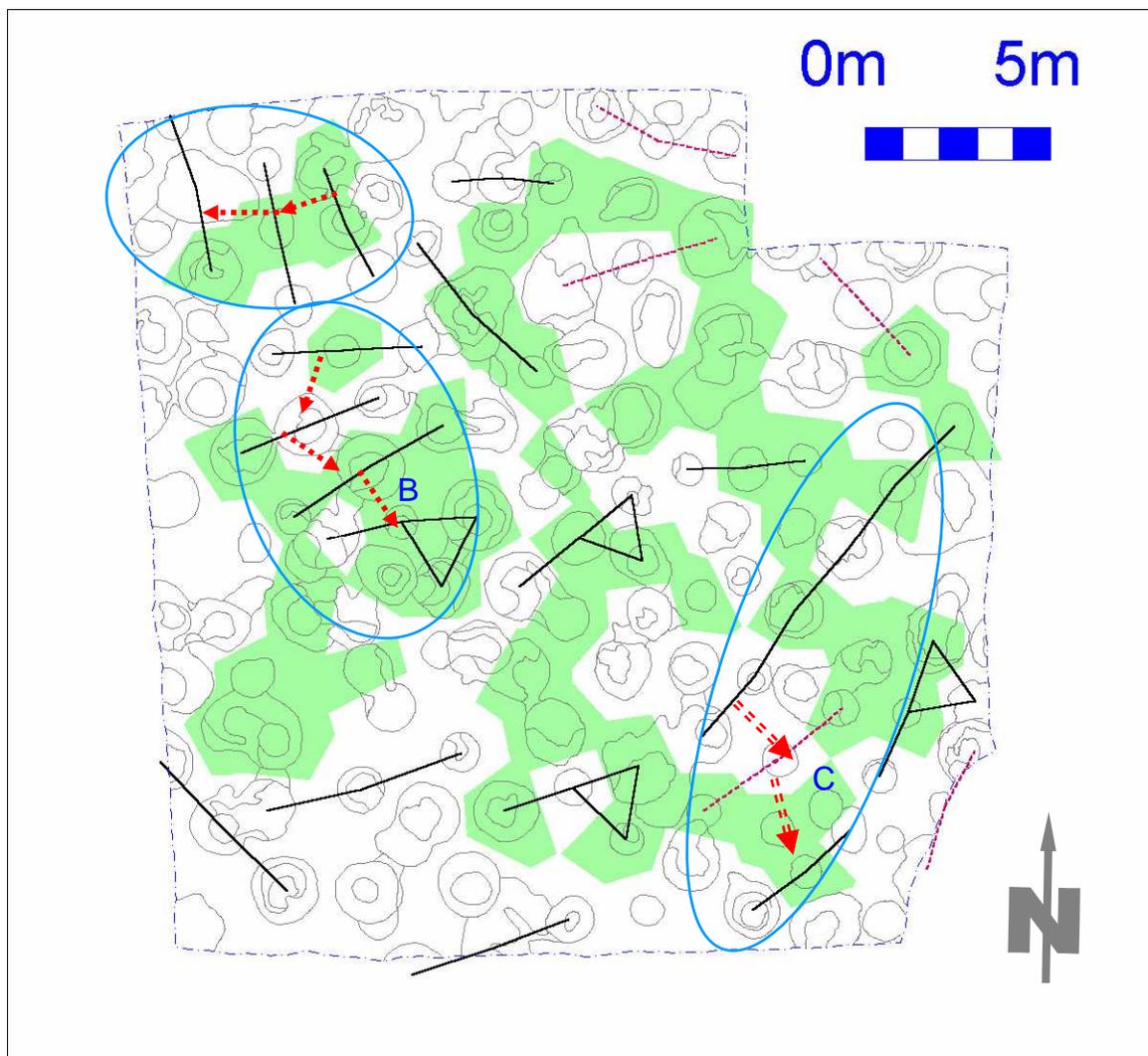


Abb. 2.41: Abensberg-Arnhofen. Schachtgruppen im Bereich der Halde und ihr Bezug zur Lage sechsseitiger Thiessenpolygone (grüne Flächen).

Die nach Lage, Ausrichtung und Regelabstand zusammengehörenden Gruppen sind mit blauen Ellipsen markiert und Großbuchstaben durchnummeriert. Die Abbaurichtung wird von roten Pfeilen markiert. Bei unsicheren Verbindungen ist die erschlossene Ausbreitungsrichtung mit einfach gestrichelten Pfeilen angedeutet, bei einem noch problematischeren Fall (Verband C) mit doppelt gestrichelten.

Auch hier zeigen sich bei der Kartierung der regelmäßigen “Schachtflächen“ wieder größere, zusammenhängende Areale. Das größte misst 123,1 m² und besteht aus 35 Polygonen. An drei Stellen ist die Verbindung aber so schmal, dass eine Unterteilung in drei kleinere Bereiche analytisch sinnvoll erscheint. Der erste dieser Teile besitzt eine 69,2 m² große Fläche aus 18 Thiessenpolygonen und liegt im Norden der Ausgangsfläche. Mit 46,4 m² und 15 “Schachtflächen“ ist der zweite, südliche Teil nur wenig kleiner. Im Nordosten liegt der dritte Teil. Er besteht nur aus 2 Polygonen mit zusammen 7,47 m².

Wie im Fall der Kiesgrube werden auch in der Halde Schachtgruppen bereits bei Einhaltung dreier Kriterien zu Verbänden zusammengefasst. Im Gegensatz zur Kiesgrube konnte aber hier die Mehrzahl der Schachtgruppen (12) nicht zu Verbänden vereint werden. Dazu zählen die linearen Gruppen L 01 (hell gelb), L 02 (fahl orange), L 09 (hell rot), L 10 (gelb), L 11 (orange) und L 12 (rot) ebenso wie die polygonen Gruppen P 02 (himmelblau), P 03 (dunkelblau) sowie P 04 (lila) und die unsicheren Gruppen U 01 (dunkelgrün) bis U 03 (limmetengrün) und U 05 (hellgrün).

Nur 11 der 23 Gruppen gingen in die drei hier gebildeten *Verbände* (A, B und C) ein. Es wurden dabei zweimal drei (A und C) und einmal vier (B) Schachtgruppen zusammengefasst. Verband C ist zudem ein Sonderfall. Bei strenger Auslegung der Kriterien würde er entfallen. Bei allen ist mindestens ein Kriterium nicht erfüllt.

Verband A liegt in der Nordwestecke der Untersuchungsfläche und umfasst die Schachtgruppen L 03 (hell beige) bis L 05 (hellgelb). Zwischen den beteiligten Gruppen ist jeweils das Regelabstandskriterium dadurch verletzt, dass bei den beiden äußeren jeweils eine besonders lange Strecke auftritt (L 04: 2,07 m, L 05: 2,31 m).

Der *Verband B* ist der einzige auf dieser Untersuchungsfläche, an dem eine polygone Gruppe (P 01 hellblau) beteiligt ist. Mit vier Schachtgruppen ist er auch der größte auf dem Areal der Halde. Das Regelabstandskriterium ist hier zweimal verletzt, einmal zwischen L 07 (beige: 1,89 m und 2,08 m) und L 08 (dunkel beige: 2,45 m und 2,27 m) und dann zwischen L 08 und P 01 (hell blau: 2,06 m, 2,02 m, 2,09 m und 2,14 m). Dies ist aber im Wesentlichen auf nur eine Triangulationslinie (2,45 m) zurückzuführen, nämlich die westliche Strecke in L 08 (dunkel beige).

Die Bildung des *Verbandes C* erfolgte nur, da bei der besonderen quellenkritischen Problematik in der Halde auch weniger akkurate Anordnungen einige Plausibilität besitzen. Wie bei den beiden anderen Verbänden, so ist auch hier das Regelabstandskriterium verfehlt. Zusätzlich sind L 13 (intensiv gelb) und U 04 (fahl grün) nicht direkt durch eine Fläche zusammenhängender, regelmäßiger Thiessenpolygone verbunden.

Durch die Größe von L 13 (intensiv gelb) kann außerdem die Flucht der Schachtgruppen nur auf der Westseite überprüft werden. Schließlich sind zwischen den beteiligten Gruppen noch weitere Schächte eingeschoben. Während aber zwischen U 04 und L 14 weiterhin regelmäßige Polygone vorhanden sind, besitzt der Schacht zwischen L 13 und U 04 keine derartige Schachtfläche. Die Bildung des Verbandes C hält – strenggenommen – keiner kritischen Prüfung der Kriterien stand.

Wie auch in der Kiesgrube treten bei den Verbänden zwei verschiedene *Abbaurichtungen* auf. Die Verbände B und C sind Nord-Süd orientiert, während im Fall von A die Abbaufont scheinbar von Ost nach West vorverlegt wurde. Das Auftreten unterschiedlicher Abbaurichtungen ist auf dieser Fläche nicht so deutlich gegliedert wie in der Kiesgrube. Allerdings liegen mit B und C zwei Verbände vor, deren Ausrichtung ungefähr parallel zueinander liegt.

Bemerkenswert erscheint die *Ausrichtung der Verbände*, wenn man sie mit denen der südlich in der Kiesgrube gelegenen Gruppen und Verbände vergleicht. Dort setzen sich diese Orientierungen fort (vgl. o. 2.1.6. Abb. 2.38 und u. 2.3. Abb. 2.49). So sind die beiden Verbände A und B in der Kiesgrube ebenso Nord-Süd orientiert wie der nördlich von ihnen gelegene Verband B in der Halde. Dies trifft auch überwiegend auf die zwischen ihnen liegenden Schachtgruppen zu, die nicht in Verbände eingegliedert werden konnten. Im Einzelnen handelt es sich um L 09 (fahl rot), L 11 (orange) und P 03 (dunkelblau) in der Halde, sowie L 01 (hell beige) und L 04 (fahl orange) in der Kiesgrube. Zwischen dem Verband C in der Kiesgrube und C in der Halde stimmen zwar die Ausrichtungen nicht überein, dafür sind die Achsen der jeweils am nächsten zur gemeinsamen Grenze liegenden Schachtgruppen annähernd gleich ausgerichtet. Das betrifft L 13 (intensiv gelb) in der Kiesgrube sowie U 05 (hell grün) und L 14 (dunkel orange) in der Halde.

Die auf den beiden Untersuchungsflächen unabhängig voneinander ermittelten Strategien der Abbaufontvorverlegung lassen sich jenseits des teilweise nur 3 m breiten Grenzstreifens zwischen beiden Flächen auf der jeweils anderen wieder finden. Diese Beobachtung ist deshalb besonders bemerkenswert, weil sich hier die Ergebnisse von verschiedenen Untersuchungsflächen gegenseitig stützen.

Die Plausibilität der folgenden Ausführungen hängt davon ab, ob man den Halden-Verband C für ein "echtes" Ergebnis hält.

In diesem Fall kann man eine *Trennlinie* erkennen, die in etwa von Nord nach Süd durch beide Flächen läuft. Sie trennt jeweils die Bereiche mit einer unterschiedlichen Abbaurichtung. Die Anlage von Schächten, Schachtgruppen und Verbänden auf beiden Seiten dieser Linie muss zeitlich parallel zueinander erfolgt sein.

Dass beispielsweise in der Kiesgrube zuerst die Westhälfte bis zum Rand abgebaut worden wäre, bevor man weiter östlich tätig wurde, ist schwer vorstellbar. Die Trennlinie markiert demnach die Grenze zwischen den Kontrollbereichen zweier unterschiedlicher Benutzergruppen.

Einschränkend ist allerdings zu bemerken, dass mit jedem der aufeinander basierenden Auswertungsschritte (Datenpunktsetzung – Triangulation – Gruppenbildung – Verbandsbildung) die Aussageunsicherheit der folgenden Auswertungsschritte wächst. Da die Datengrundlagen für GIS-Auswertungen auf den Entscheidungen des archäologischen Bearbeiters und nicht auf mathematisch-statistischen Rechenergebnissen beruhen, sind sie ebenso kritikwürdig wie andere archäologische Interpretationen auch.

Die Annahme, die Trennlinie sei eine Grenze zwischen den “*Claims*“ zweier unterschiedlicher Benutzergruppen, ist eine solche interpretative Auslegung einer GIS-Beobachtung. Folgt man dieser Interpretation, ergeben sich Aussagen zu Nutzungsdauer und Datierung der *Claims*. In jedem befanden sich über 20 Schachtgruppen und beide laufen über mehr als 10 Aktivitäten hinweg parallel zueinander. Eine solche Situation kann sich nur dann entwickeln, wenn die Flächen über Generationen hinweg benutzt wurden; die *Claims* waren demnach erblich.

Erbliche Ansprüche, die zur Übertragung von Häusern bzw. der dazu gehörigen Hofplatzfläche führten, gab es schon seit der Bandkeramik (KRAHN 2003, 526; ZIMMERMANN et al. 2006, 165f.). Bei einem Bergwerk handelt es sich jedoch um eine rein ökonomisch genutzte Fläche und nicht um einen Wohnbereich. Die Nutzungsphase, mit der man die *Claims* verbinden kann, entspricht der der regelmäßigen Schachtverteilung und ist demnach in das frühe Jungneolithikum einzuordnen (43. bzw. 42. Jh. v. Chr.; vgl. o. 2.1.2.). Ähnlich wie bei der bandkeramischen Erbregelung dürfte auch hier das Recht nicht auf eine individuelle Person bezogen gewesen sein, sondern auf den Angehörigen einer Familie als ihr Repräsentant. Während die Erblinie im Altneolithikum über männliche Angehörige einer Familie lief (EISENHAUER 2003), gibt es für das frühe Jungneolithikum keine Hinweise auf die Art der Erbregelung. Schließlich bedurfte es mindestens zweier weiterer Personen, um das Nutzungsrecht wahrnehmen zu können. Der Inhaber des Nutzungsrechtes musste also gleichzeitig die Möglichkeit zur Rekrutierung weiterer Arbeitskräfte besitzen. Allerdings reichten dafür bereits die weiteren Angehörigen einer Kernfamilie aus. Solange es keine Erkenntnisse über die jungneolithische Verwandtschaftsorganisation und ihre Erbschaftsregelungen gibt, bleibt es Spekulation, welche Nachkommen jeweils das Recht erbten.

Abschließend sei noch einmal betont, dass die Aussagen zum Thema “*Claim*“ von interpretativem Charakter sind, und nicht wie die des Abschnittes 2.1.4. auf eindeutigen Ergebnissen basieren.

Die für die Kiesgrube erörterte Frage nach der *Arbeitsteilung* kann man auch anhand der Ergebnisse für die Halde nachvollziehen. Obwohl der Arbeitsaufwand für die zumeist nur etwa 4 m bis 5 m tiefen Schächte auf dem Areal der Haldengrabung wesentlich geringer war, als für die tieferen Schächte in der Kiesgrube, waren die Schachtgruppen gleich groß. Auch hier bestehen 18 der 23 Gruppen aus drei Schächten. Ihre Größe entspricht damit der optimalen Größe einer Arbeitsgruppe (3 Personen). Wegen der geringeren Teufe hätte hier in der gleichen Arbeitszeit jeweils ein Schacht mehr angelegt werden können, als auf dem Areal der Kiesgrube. Dies geschah aber im Regelfall nicht. Nicht die Arbeitszeit sondern der Ertrag der Bergbauaktivität war also für die Bergleute der entscheidende Faktor. Wenn der Hornstein mit drei Schächten abgebaut war, wurde die Aktivität beendet, unabhängig von der dafür nötigen Arbeitszeit. Als man mit dem Abbau in das Areal der Kiesgrube vorrückte, behielt man die Vorgehensweise bei, obwohl jetzt drei Schächte wesentlich mehr Arbeitszeit erforderten.

Nicht die stetige Erhöhung des Ertrages war demnach das treibende *ökonomische Moment*, sondern die Gewinnung einer bestimmten, in ihrer Höhe immer etwa gleichbleibenden Menge an Hornsteine. Und dies änderte sich nicht, auch wenn der jeweils für eine Abbauaktivität nötige Arbeitsaufwand stark variierte.

2.1.8. Abbauorganisation im Vergleich

Die *bisherigen Ergebnisse* lassen sich wie folgt zusammenfassen. Die untersuchten Flächen wurden höchstwahrscheinlich um 4200 v. Chr. innerhalb einiger Jahrzehnte zur Anlage von Schächten genutzt (s. o. 2.1.3.). Die beobachteten Abbaumuster (s. o. 2.1.4.2., 2.1.6. und 2.1.7.) gehören in das frühe Jungneolithikum. Irgendwann danach wurden noch einmal Schächte auf den bereits aufgelassenen Flächen angelegt, um nochmals die besser zugänglichen Flözpartien abzubauen (s. o. 2.1.4.2.). Die erste Abbauphase erfolgte planmäßig, während die späteren nur noch die bergbau-technische Regel eines (verringerten) Sicherheitsabstandes zu den bereits bestehenden Schächten berücksichtigten (a. a. O.). Der planmäßige Abbau besaß verschiedene Niveaus der Planungstiefe: man betrachtete die potentielle Abbaufäche von vornherein grundsätzlich als begrenzt (s. o. 2.1.4.1.); innerhalb dieses begrenzten Raumes wurden die Schächte der jeweiligen Aktivität plaziert (s. o. 2.1.5.); dieses Vorgehen beruhte auf dem Wissen um die genaue Lage der Vorgängerschächte, je besser die Kenntnis desto optimaler die Platzierung.

Übersetzt in ein *wirtschaftshistorisches Modell* bedeutet dies Folgendes. Die Bergwerksfläche war in Teilflächen für unterschiedliche Benutzergruppen unterteilt (s. o. 2.1.6. und 2.1.7.). Innerhalb einer Teilfläche entstand zunächst eine Schachtgruppe von wenigen direkt aufeinanderbezogenen Abbaugruben, die alle innerhalb einer Aktivitätsphase von einer einzigen Arbeitergruppe gegraben und wieder verfüllt wurden. Einige Zeit nach Abschluss dieser Aktivität kehrte die gleiche Benutzergruppe wieder auf diese Teilfläche zurück und legte direkt daneben eine neue Schachtgruppe an. Dass dabei jeweils die neue Schachtgruppe mit Bezug auf die alten Schächte und die noch nicht abgebaute Bergwerksfläche angelegt wurde, beweist, dass die Beteiligten die Bergwerksfläche von vornherein als endliche Ressource behandelten. Die Aufteilung der Abbaufächen bestand also, bevor man mit dem Bergbau an einer Stelle begann. Die gleichzeitige Existenz kurz- und langfristiger Planungsmuster macht die Existenz von Zugangsbeschränkungen wahrscheinlich.

Mit der Zeit entstanden ganze Reihen von aufeinanderbezogenen Schachtgruppen – sie werden oben als Schachtverbände bezeichnet (s. o. 2.1.5. bis 2.1.7.). Anhand der unterschiedlichen Abbaurichtung kann man jeweils mehrere Schachtverbände zu zwei größeren Gruppierungen zusammenschließen. Zwischen diesen lässt sich eine (hypothetische) Grenze ziehen. Hält man diese Interpretation für zutreffend, ergibt sich als Gesamtbild eine Abbauorganisation, bei der es (mindestens) zwei Claims gab, einen westlichen und einen östlichen.

Die Arbeitergruppen bestanden vermutlich normalerweise aus drei Personen. Bei seiner Tätigkeit nutzte ein solches Bergbauteam bei jeder Schachtgruppe verschiedene Abstandsmaße, was die Identifizierung zusammengehöriger Schächte erlaubte (s. o. 2.1.5.).

Alle Bergleute, auch die welche nach dem Ende des systematischen Abbaus zwischen alten Schächten noch einmal neue anlegten, benutzten zur Vermessung die gleiche Längeneinheit (s. o. 2.1.4.3.).

Während einer *Abbauaktivität* wurden in der Regel drei Schächte in einer Linie angelegt. Aber gelegentlich entstanden auch komplexere Strukturen aus vier oder mehr Schächten, die wegen ihres Umrisses im Plan als polygone Schachtgruppen bezeichnet werden, und sich über zwei 'Zeilen' erstrecken (s. o. 2.1.5.). Die Schächte wurden direkt nach ihrer Auflassung von den Bergleuten zugeschüttet (s. o. 2.1.5. und vgl. u. 2.2.). Dafür benutzte man meist einen Teil des Versatzes, der beim jeweils nächsten Schacht anfiel. Nach dem Auflassen verblieb eine Reihe aus mehreren trichterförmigen Senken an der Stelle der verfüllten Schächte. Von diesen aus maß man bei der Wiederaufnahme des Abbaus die Plätze für die neuen Schächte ein. Je besser die Lage der alten Schächte bekannt war, und je sorgfältiger man arbeitete, desto optimaler erfolgte die Platzierung. In der Regel wurde beim Einmessen mit einer Präzision vorgegangen, deren Fehler sich im Bereich von weniger als 7 cm bewegt (s. o. 2.1.4.3.)

Die während des DFG-Projektes ausgegrabene Fläche dürfte in einen *Zeitraum* von mindestens 20 Jahren abgebaut worden sein. Dieser Mindestansatz ergibt sich, wenn man eine *Abbauaktivität* pro Jahr und einen Vortrieb von Nord nach Süd annimmt. Der wirkliche *Abbauzeitraum* muss aber wesentlich größer gewesen sein, weil bei den östlichen Schachtverbänden in der Kiesgrube der Abbau von West nach Ost erfolgte. Eine verlässliche Schätzung ist aber nicht möglich, da die Schachtverbände im östlichen Teil der Grabungsflächen nicht vollständig erfasst wurden. Als vage Vermutung sei eine Größenordnung von 50 bis 100 Jahren vorgeschlagen.

Es fragt sich nun, ob die Erkenntnisse zur Arnhofer Abbauorganisation einen Ausnahmefall darstellen, oder ob sich bei *Vergleichen* Ähnlichkeiten zu anderen Bergwerken finden lassen. Diese Frage besteht aus zwei Teilen. Der erste umfasst den Bereich der archäologischen Forschung: Wurde auch bei anderen Bergwerken eine ähnliche Planungstiefe beim Abbau beobachtet? Der zweite Teil der Frage zielt auf die Einordnung der Ergebnisse: Wenn es anderswo eine komplexe *Abbauplanung* gegeben hat, ist die in Arnhofen beobachtete damit vergleichbar?

Zum Vergleich bieten sich Bergwerke an, bei denen die *Abbauorganisation* ebenfalls anhand der Verteilung und Gruppierung von Schächten untersucht wurde. Zusätzlich sollten die Bergwerke räumlich und zeitlich benachbart sein, um nicht von gänzlich verschiedenen Bedingungen ausgehen zu müssen. Angesichts der doch recht wenigen im westlichen Mitteleuropa erforschten Bergwerke, sind dabei auch Fälle aus den Nachbarregionen heranzuziehen.

Schließlich bieten sich natürlich in erster Linie solche Plätze an, bei denen die Frage nach der Abbauorganisation mit ähnlichen Methoden untersucht wurde.

Aus diesen Gründen beschränkt sich die Gegenüberstellung auf drei *Vergleichsbeispiele*: das südniederländische Rijckholt-St.Gertruid (FELDER et al. 1998), das zentralpolnische Krzemionki (BORKOWSKI 1995) und das nordostfranzösische Jablines (BOSTYN/LANCHON 1992). In Rijckholt-St.Gertruid konnte man die Abfolge von Befunden durch die vollständige Ausgrabung ganzer Schachtserien archäologisch nachvollziehen. Bei den beiden anderen wurde die Organisation des Abbaus mit einer der hier verwendeten Methoden (Tesselerung) untersucht, wobei in Krzemionki indirekt auch die Triangulationsergebnisse Berücksichtigung fanden.

Zunächst ist die *chronologische Beziehung* zwischen den verglichenen Fundplätzen zu betrachten. Rijckholt und Jablines stehen dem Bergbau in Arnhofen zeitlich relativ nahe, Krzemionki ist schon wesentlich jünger. Die in Arnhofen untersuchte Abbauorganisation mit ihren Duckelbauen gehört wie gesagt überwiegend ins 43. oder 42. Jh. v. Chr.

Der im niederländischen Bergwerk von Rijckholt-St.Gertruid untersuchte Tiefbau mit Gruben in Duckel- und Weitungsbauförmlichkeiten datiert in etwa in die Zeit von 3950 v. Chr. bis 3800 v. Chr. (FELDER et al. 1998, 65 Fig. 37). Durch Keramikfunde sind aber auch Aktivitäten während der Gruppe Stein zwischen 3500 v. Chr. und 2600 v. Chr. belegt.

In Jablines ist der zumeist mit Duckelbauen verbundene Bergbau der Zeit zwischen 4200 v. Chr. und 3600 v. Chr. zuzuordnen (PAZDUR 1992) und mit Keramikfunden der Gruppe Cerny Barbuise zu verbinden (BOSTYN/LANCHON 1992, 128f.). Aber auch hier gibt es, wie in Rijckholt, später eine erneute Nutzung zwischen 3200 v. Chr. und 3000 v. Chr. Diese ist sowohl durch Keramikfunde des Neolithique Moyen II (NM II) wie durch entsprechende ¹⁴C-Daten belegt (a. a. O.). Die zweite Abbauphase scheint zwar mit einer räumlichen Trennung einherzugehen (a. a. O. 216, Fig. 214), jedoch gibt es auch in Bereichen der ersten Phase immer wieder Überschneidungen zwischen zwei Schächten, die damit verbunden sein könnten. Der Abbau hat aber wahrscheinlich bedeutend früher begonnen, denn in einer benachbarten Siedlung aus der Zeit der Gruppe Villeneuve-Saint-Germain (49. bis 48. Jh. v. Chr.) fanden sich schon größere Mengen des in Jablines abgebauten Rohmaterials (a. a. O., 217).

In Krzemionki schließlich wurde der Abbau, bei dem zahlreiche verschiedene Grubentypen von der Pinge bis zum Weitungsbau eingesetzt wurden, in der späten Trichterbecher-Kultur und während der Kugelamphorenkultur durchgeführt. Absolutchronologisch ist diese Phase etwa mit der Zeit von 3400 v. Chr. bis 2800 v. Chr. gleichzusetzen (BORKOWSKI 1995, 26f.). Beim Bergbau in Krzemionki gab es scheinbar keine langfristigen Unterbrechungen

Die weiter unten diskutierten Schachtgruppen aus Krzemionki fallen in die Zeit der Kugelamphorenkultur zwischen 3300 v. Chr. und 2800 v. Chr. (a. a. O., 32 Fig. 13).

Die räumlichen *Entfernungen* zwischen Arnhofen und den Vergleichsplätzen schwanken zwischen ca. 488 km bei Rijckholt und ca. 718 km bei Krzemionki (Jablones 650 km). Sie liegen damit in einer Größenordnung, die etwa dem doppelten mittelneolithischer Handelsreisen (ca. max. 300 km) entsprechen (s. u. 4.3.3.2.). Die Bergwerke sind damit gerade soweit voneinander entfernt, dass man gleichartige Beobachtungen als voneinander unabhängig betrachten kann und sie deshalb auf gleiche oder ähnliche Kausalfaktoren zurückgehen sollten. Zugleich ist der Transfer von technischem Know-how über solche Distanzen durchaus möglich. Zusammen mit Arnhofen decken diese Plätze einen Raum vom östlichen Westeuropa (Jablones) bis zum östlichen Mitteleuropa ab (Krzemionki). Sieht man einmal vom etwas jüngeren Krzemionki ab, sind die Ergebnisse einer Zusammenschau für das Jungneolithikum dieses Raumes verallgemeinerbar.

Bei den *geologischen Bergbaubedingungen* gibt es zwischen Arnhofen und den anderen Plätzen größere Unterschiede. Das Deckgebirge bis einschließlich des Flözes besteht in Arnhofen aus Lockergestein (Sand und Kies), während es bei den Vergleichsfällen mindestens z. T. aus Kreide- (Rijckholt und Jablones) oder Jurakalken (Krzemionki) gebildet wird. In Rijckholt und Krzemionki sind diese Straten noch von mächtigen Schichten aus Lockergestein (Kies und Sand) bedeckt.

Die *Anlage von Gruben* dauerte bei den Vergleichsplätzen aufgrund des Vortriebs durch felsiges Gebirge in der Regel wohl wesentlich länger als in Arnhofen. Zugleich waren die dortigen Schächte aber so standfest, dass ein Abbau über mehrere Jahre hinweg möglich war. In Krzemionki ist dies durch Schichten eingespülten Sediments in den Strecken von verschiedenartigen Weitungsbauen ('chamber mines' und 'pillar mines') sogar nachgewiesen. Dabei waren erwartungsgemäß die komplizierteren Grubenformen ('chamber mines') mit durchschnittlich 7 Jahren länger offen zugänglich, als die einfachen ('pillar mines') mit etwa 3 Jahren (BORKOWSKI 1995, 150). Einspülungen während des Offenstehens eines Schachtes konnten auch in Rijckholt beobachtet werden (FELDER et al. 1998, 22). Aufgrund der aus einem Schacht geborgenen Schneckenfauna ist auch hier zumindest ein Fall eines mehrwöchigen, wahrscheinlich aber wesentlich längeren, Offenstehens anzunehmen (vgl. FELDER et al. 1998, 52). In Arnhofen konnten die Schächte dagegen maximal nur wenige Monate offenstehen, ohne dass es zu spontanen Einstürzen kommen konnte (vgl. o. 1.5.). In der Regel wurden sie direkt nach der Aufgabe verfüllt (vgl. o. 2.1.5.).

Auch an den Vergleichsplätzen wurden die Schächte von den jungsteinzeitlichen Bergleuten wieder intentionell zugefüllt (Rijckholt: FELDER et al. 1998, 37; Jablines: BOSTYN/LANCHON 1992, 136ff.). In Krzemionki erfolgte dies unmittelbar nach der Auflassung (BORKOWSKI 1995, 147). In Rijckholt wurden alte Schächte absichtlich mit dem Abraum von Schachtneuanlagen verfüllt (FELDER et al. 1998, 39). Allerdings konnte man nicht feststellen, wie lange nach der Aufgabe eines Schachtes seine Verfüllung erfolgte. Das absichtliche Verfüllen der aufgelassenen Schächte war also scheinbar ein allgemein übliches Vorgehen beim neolithischen Bergbau – zumindest in den hier repräsentierten Zeitphasen.

Das erste Ergebnis des Vergleichs ist also, dass das Zuschütten aufgelassener Schächte in Arnhofen keine lokale Besonderheit war. An den Vergleichsplätzen war das Gebirge aber wesentlich standfester der Arnhofener Kies. Demnach sind dort andere Gründe hinter diesem Vorgehen zu vermuten (s. u.). Dass auch die neolithischen Bergleute in Arnhofen nicht ausschließlich aufgrund bergbautechnischer Bedenken handelten, wird bei den Ergebnissen der Fundverteilungsanalyse zu Feld 1 zu diskutieren sein (s. u. 2.2.).

Der zentrale Vergleichsaspekt ist die *Abbauorganisation*, also die Frage, ob sich zusammenhängende Schächte erkennen lassen, wie groß diese Strukturen sind, und mit welcher Bergbauintensität und -organisation sie verbunden sind.

Im Fall von *Rijckholt-St. Gertruid* konnte man anhand der Reihenfolge von auf der Schachtsohle aufgefahrenen Strecken erkennen (FELDER et al. 1998, 38ff.), dass die erste Weitung (‘gallery’) immer in Richtung eines bereits bestehenden Schachtes vorangetrieben wurde. Die nächste ging dann in die direkt entgegengesetzte Richtung. Als Grund dafür wurde Sicherheitsbedürfnis vermutet: man schuf sich immer zuerst einen Fluchtweg zu den Weitungen des Vorgängerschachtes. Außerdem ist zu erkennen, dass die Bergleute die neuen Schächte bevorzugt parallel zur Hangstreichrichtung anlegten, auf dem sich das Bergwerk befindet. Da die Feuersteinschichten nur leicht hangaufwärts einfallen (a. a. O., 10 Fig. 6), konnte man auf diese Weise die Erkenntnisse aus dem Vorgängerschacht fast vollständig auf einen neuen übertragen, wenn er im Hang auf gleicher Höhe lag. Zugleich war jeder Vortrieb hangaufwärts mit einem größeren Arbeitsaufwand verbunden, weil mehr hangendes Gebirge zu beseitigen war.

Auch in Arnhofen wurde das zuvor erworbene Wissen um die Beschaffenheit des Untergrundes soweit wie möglich weiterverwendet. Dafür rückte man jeden neuen Schacht einer Gruppe nur soweit von seinem Vorgänger ab, als es der Regelabstand bzw. die Stabilität des Gebirges nahe legten.

Zudem wurde jede neue Schachtgruppe so entlang der alten Abbaufont plziert, dass man sie bei einer neuen Aktivität jeweils nur um einen Schachtabstand weiter nach außen in unbekanntem Untergrund vorverlegte.

Das wichtigste Ergebnis stellt in diesem Zusammenhang die archäologisch nachvollziehbare *Gruppierung der Schächte in Rijckholt* dar. Die Bearbeiter verbanden dafür die Schächte untereinander (FELDER et al. 1998, 38ff.), die mit ihren "Fluchtwegstrecken" auf vorangegangene Schächte Bezug nahmen. Diese Konstellation belegt die Existenz einer personellen Kontinuität beim Abbau. Es waren also die gleichen Arbeitergruppen am Werk, die – wie in Arnhofen – die Tiefe und die Richtung von Beobachtungen im Untergrund einmaßen und sie sich bis zur nächsten Schachtanlage merkten. Ohne Meßinstrumente hätte man in mehreren Metern Tiefe wohl schwerlich stets aufs Neue die alten Strecken wiedergefunden, zumal sie nur wenige Dezimeter hoch waren. Die größte Schachtgruppe umfasst 20 Schächte.

Anhand der Anordnung der Schächte kann man die Rijckholter Gruppen in Anordnungselemente unterteilen. Senkrecht zum Gefälle und parallel zum Hang legte man die Schächte im Zickzack und manchmal auch in Linien angeordnet an. Nach drei bis sechs Schächten wurde die Abbaufont den Hang hinauf voran geschoben. Dafür platzierte man den nächsten Schacht hangaufwärts genau in einer Linie mit seinen beiden Vorgängern aus dem letzten Zickzackschritt.

Die schematischen Pläne dieser Schachtgruppen besitzen ausgesprochen große Ähnlichkeit mit den für Arnhofen aufgrund geostatistischer Verfahren gebildeten Gruppen (vgl. FELDER et al. 1998, 38 Fig. 19 IV). Nur sind sie wesentlich komplexer als in Arnhofen und umfassen in der Regel jeweils gleich mehrere Zickzack- und Linienelemente. In Rijckholt variieren die Abstände auch wesentlich stärker. Sowohl bei den linearen wie bei den Zickzackelementen wurde die Anordnungsstruktur nur ungenau umgesetzt. Bei den Linien erfolgte die Anordnung häufig nicht genau in einer Flucht, bei den Zickzackanordnungen schwanken Winkel und Abstände der einzelnen Zickzackschritte stark. Das dürfte den in Rijckholt auf kleinstem Raum auftretenden Unterschieden in der Standfestigkeit des Gebirges geschuldet sein (a. a. O., 37; vgl. a. a. O., 24). Die einfachsten Gruppen in Rijckholt sind wesentlich komplexer als die größten Polygongruppen in Arnhofen.

Die Schachtgruppen in Arnhofen sind wie gesagt alle von wesentlich einfacherer Struktur und bestehen in der Regel aus einer Dreier-Linie. Selten gibt es polygone Komplexe, die sich über zwei Schachtzeilen hinweg erstrecken (vgl. o. 2.1.5. Abb. 2.20). Die Anlage einer Schachtgruppe in Arnhofen ist nach der Arbeitszeit weniger Aufwand als die eines einzelnen Schachtes in Rijckholt.

Die zeitliche Tiefe der niederländischen Schachtgruppen ist wahrscheinlich wesentlich größer als die bei einem ganzen Schachtverband in Arnhofen.

In Arnhofen basiert die Schachtgruppenbildung auf der kompromißlosen Zuweisung nach Abständen. Möglicherweise wurden durch dieses Vorgehen in Arnhofen komplexere, 'echte' historische Großgruppen, deren Schächte ähnlich ungenau angeordnet waren wie in Rijckholt, in mehrere Elemente zerschnitten.

Wie gesagt entsprechen die kleinsten Rijckholter Schachtgruppen in Arnhofen den größten Schachtverbänden (s. o. 2.1.6. Abb. 2.38). Daher ist es bemerkenswert, dass auf beiden Bergwerken für die Raumnutzung grundsätzlich gleiche Planungsmuster (Linien- und Zickzackelemente) benutzt wurden. Da in Rijckholt hinter den größeren Schachtgruppen eine zeitliche Tiefe von mehreren Jahrzehnten steht, kann man sagen, dass dort das Muster Teil einer über lange Zeit hinweg befolgten Abbauregelung war. In Arnhofen dagegen wird etwa das dem Zickzackschritt entsprechende Polygonmuster immer wieder innerhalb nur einer Abbauaktivität umgesetzt. Zwischen diesen Umsetzungen vergingen manchmal aber Jahrzehnte, wie am Abstand von über 20 Metern zwischen einzelnen polygonen Schachtgruppen zu erkennen ist.

In beiden Bergwerken liegen dem Abbau also die *gleichen Planungselemente* zugrunde. Allerdings ist das Planungskonzept, das in Rijckholt die Grundlage des langfristigen Vorgehens darstellt, in Arnhofen ein immer wieder reproduziertes, kurzfristiges Element im Rahmen einer längerfristig konzipierten Abbautätigkeit. Bevor man hier jedoch weiterreichende Schlüsse zieht, ist zu bedenken, dass es sich um sehr einfache und allgemeine Elemente von Raumnutzungsstrategien handelt. Zumindest in Arnhofen gehen sie jedoch auf konkrete Planung der einzelnen Gruppen sowie auf über Generationen streng eingehaltene, allgemeine Messregeln zurück.

Neben dieser Ähnlichkeit gibt es noch weitere, die besonders im Hinblick auf die *Benutzergruppen* interessant sind. In Rijckholt wäre aus geologischen Gründen der Vortrieb des Abbaus senkrecht zum Gefälle bzw. parallel zur Hangstreichrichtung optimal. Da das abgebaute Feuersteinflöz hangaufwärts unter immer stärkeren Ablagerungen verschwand, musste man dort ja auch zunehmend tiefere Schächte graben (FELDER et al. 1998, 38 Fig. 19 II). Dementsprechend war immer mehr Arbeit in den Feuersteinabbau zu stecken. Innerhalb der Schachtgruppen wurde nun zunächst mehrere Male eine arbeitsaufwendige Erweiterung vermieden. Aus einem bestimmten Grund legte man dann aber den nächsten Schacht einer Schachtgruppe wieder hangaufwärts an (a. a. O., 38 Fig. 19 IV). Auf diese Weise wurde innerhalb der beobachteten Schachtgruppen der Abbau bis zu sechsmal den Hang hinauf vorverlegt. Nördlich und südlich der untersuchten Schächte setzt sich das Grubenfeld aber entlang des Hanges fort.

Der Grund für einen hangaufwärts gerichteten Vortrieb der einzelnen Schachtgruppen beim gleichzeitigen Verzicht auf hangparallele Erweiterung ist nicht geologisch vorgegeben und muss deshalb sozial erklärt werden (FELDER et al. 1998, 68f.). Demnach gab es in Rijckholt nicht nur eine Benutzergruppe, die in optimaler Weise zunächst entlang des Hanges auf einem bestimmten Niveau abbaute. Der primär hangaufwärts gerichtete Vortrieb zeigt, dass der Abbau von zahlreichen Gruppen nebeneinander durchgeführt wurde (a. a. O., 38 Fig. 19 IV Zone A). Durch die streifenförmig den Hang hinauflaufenden Begrenzungen war es mehreren Gruppen auf einmal möglich, die jeweils geologische vorteilhaftere Position in gleicher Weise auszunutzen.

Die Fläche des zukünftigen Abbaus war also in Rijckholt vor Beginn des Bergbaus in Streifen unterteilt worden, die sich parallel zum Gefälle über den Hang erstreckten. Die 'Breite' (Nord-Süd-Erstreckung) eines solchen Streifens ist an der Breite einer Schachtgruppe zu erkennen und betrug etwa 20 m bis 30 m. Nimmt man an, dass alle Benutzer einen ungefähr gleich großen Abschnitt erhielten und setzt diesen Wert in Bezug zur Länge des Grubenfeldes von ca. 450 m (a. a. O., 9 Fig. 5), so erhält man eine Anzahl von 15 bis 23 Teilflächen, was der gleichen Zahl unabhängig voneinander aktiver Benutzergruppen entspricht.

Die Bearbeiter gelangen aufgrund theoretischer Überlegungen zu dem Schluß (a. a. O., 69f.), dass es sich bei den Bergarbeitergruppen um Familienverbände aus der Umgebung des Bergwerks handelte. Die hier für Rijckholt hochgerechnete Zahl von insgesamt 15 bis 23 Benutzergruppen lässt sich gut mit dieser Annahme vereinbaren.

In Arnhofen konnte mit der unterschiedlichen Abbaurichtung zwischen mehreren Schachtverbänden nur einmal ein vergleichbarer Befund entdeckt werden (s. o. 2.1.6. Abb. 2.38 und 2.1.7. Abb. 2.41). Es handelt sich um die sogenannten Claims. Deren Grenze lief ebenfalls parallel zur Richtung der ungünstiger werdenden Abbaubedingungen. Beiderseits dieser Grenze stieß man beim Vortrieb in Richtung Süden sukzessive auf immer tiefer liegende Flöze. Die oben nur vermutungsweise geäußerte Interpretation als Claimgrenze erhält durch den Rijckholter Befund eine höhere Plausibilität.

Solche Flächenteilungen auf Bergwerken erlauben *Überlegungen zum Nutzungsrecht*. Während in Rijckholt aufgrund der Teilflächengröße tatsächlich jeweils ein Familienverband (Lineage) als Inhaber der Nutzungsrechte in Frage kommt, liegen in Arnhofen im westlichen Claim zwei Schachtverbände. Pro Claim waren in Arnhofen also mindestens zwei nutzungsberechtigte Untergruppen aktiv, die ihre Berechtigung aber beide aus der gleichen Anspruchsgrundlage ableiteten, denn sie benutzten ja denselben Claim. Es kommen hier also geschichtete Benutzergruppen in Frage (vgl. dazu u. 4.1.3.). Die Gruppe der auf einem Claim Abbauberechtigten war wahrscheinlich wesentlich größer als eine einzelne Familie.

Zum Bergbau traten aber nur Arbeitsgruppen in der Stärke einer Familie an. Zu denken wäre bei dieser Schichtung entweder an die nächsthöhere Ebene der Verwandtschaftsallianz (vgl. u. 4.3.3.1.2.), oder an Bewohner aus der gleichen Siedlung. Eine derartige Situation ist gut mit einem geschichteten Nutzungsrecht zu vereinbaren (s. u. 4.1.3.), wie es in der Völkerkunde häufig bei ‘face-to-face‘-Gesellschaften anzutreffen ist. Dabei vertrat vielleicht die gesamte Gruppe der Abbauberechtigten den Nutzungsanspruch gegenüber Dritten, während die konkrete Nutzung von den einzelnen Haushalten ausging. Da in der Arnhofener Grabungsfläche nur eine Grenzlinie gefunden wurde, gibt es keine Informationen über die tatsächliche Breite einer Unterteilung. Zur Zahl der in Arnhofen insgesamt vorliegenden Flächeneinteilungen könnte man daher nur Mindestschätzungen abgeben, wenn die ungefähr zeitgleich benutzten Flächen bekannt wären – was aber nicht der Fall ist. In Niederbayern ist schließlich kaum etwas über Art und Größe von Münchshöfener Siedlungen bekannt (vgl. BÜRGER 2004), so dass auch keine Schätzungen zur Einwohnerzahl einer solchen Siedlung vorliegen. Der Umfang einer Benutzergruppe lässt sich also auch nicht indirekt über die durchschnittliche Siedlungsgröße abschätzen.

Eine weitere Ähnlichkeit ist die *Wiederaufnahme des Abbaus* in Rijckholt auf weitgehend ausgebeuteten Flächen zur Zeit der Gruppe Stein. Diese Pause dauerte mindestens 300 Jahre, möglicherweise aber auch bis zu 1200 Jahre (vgl. o.). In Arnhofen konnten in den nördlichen Flächen eindeutig spätere Störungen des primären Ordnungsmusters nachgewiesen werden (s. o. 2.1.4.2.). Wenn es sich hier also um ein ähnliches Phänomen handelt, dann wäre es durchaus vorstellbar, dass die ‘Störer‘ in Arnhofen Jahrhunderte nach der ersten Abbauphase angelegt wurden. Hier ist sowohl an die Altheimer Kultur zu denken, während der der Arnhofener Hornstein noch eine gewisse überregionale Verbreitung erfuhr, als auch an die Chamer Kultur, während der er zumindest lokal noch einmal große Bedeutung erlangte (s. o. 2.1.2. und u. 4.4.).

Fazit des Vergleichs zwischen Arnhofen und Rijckholt ist: Sowohl die Organisation der Raumnutzung als auch die daraus ableitbaren Fragen der Nutzungsrechte weisen erstaunliche Ähnlichkeiten auf. Während allerdings in Rijckholt Familien als Abbauberechtigte in Frage kommen, sind es in Arnhofen Gruppierungen aus mindestens zwei Familien.

Der zweite Vergleichsplatz, das polnische Bergwerk *Krzemionki*, ist, wie erwähnt, deutlich jünger als die in Arnhofen erfasste primäre Abbauphase. Die Analyse der Abbauorganisation erfolgte hier zum ersten Mal in der mitteleuropäischen Bergwerksforschung mit einer Tesselierung des Grubenfeldes (BORKOWSKI 1995, 104 ff.).

Die vorgelegten Ergebnisse lassen erkennen (a. a. O., 114), dass hier implizit auch die Länge der Triangulationslinien zur Analyse der Schachtverteilung verwertet wurde. Die Auswertung stützt sich nämlich auf die Distanzen zwischen den direkt benachbarten Schächten in der Tessellierung – und diese werden ja bei einer Triangulation verbunden. Für die Ermittlung repräsentativer Schachtmittelpunkte konnte man auf die Mittelpunkte der trichterförmigen Senken in der heute noch erhaltenen Haldenlandschaft zurückgreifen. Die Untersuchung der Schachtanordnung mit einer Tessellierung umfasste insgesamt 8 Teilflächen entlang des langgestreckten, u-förmigen Grubenfeldes von Krzemionki. Für die Auswertung der Schachtabstände wurden durch Zusammenfassungen von einmal drei und zweimal zwei Teilflächen insgesamt vier Verteilungen gebildet, die jeweils einen größeren Abschnitt der Bergwerksfläche abdecken (a. a. O., 125ff.).

Durch Ausgrabungen sind schon länger verschiedene Arten von Bergbaugruben in Krzemionki bekannt. Borkowski benutzte die aus der Tessellierung abgeleiteten Abstände (ders. 1995, 114ff.), um die nur durch obertägige Haldentrichter repräsentierten Schächte den verschiedenen Abbautypen zuzuweisen (vgl. a. a. O., 71ff.). Er ging dabei von der Beobachtung aus, dass ähnlich große Abstände jeweils in den Regionen auftraten, die aufgrund gleicher geologischer Bedingungen auch gleiche Abbauförmigkeiten vermuten ließen. Die geostatistische Methode diente ihm in erster Linie dazu, die Verbreitung der verschiedenen Abbauförmigkeiten im Grubenfeld zu rekonstruieren (a. a. O., 125ff.). Er konnte zeigen, dass sich die jeweils der Geologie am besten angepassten Abbauförmigkeiten in genau den Teilen der Bergwerksfläche liegen, wo sie auch zu erwarten sind.

Da das Flöz von allen Seiten zum Inneren der u-förmigen Bergwerksfläche einfällt (a. a. O. 66 Fig. 40), sind die jeweiligen Grubentypen wie die Schalen einer Zwiebel in Streifen entlang der u-förmig gebogenen Längsachse des Bergwerks angeordnet. Die Fläche, die jeder einzelne Grubentyp dabei bedeckt, weist so selbst einen u-förmigen Umriss auf (z. B. a. a. O., 126 Fig. 115). Außer diesem regelhaften Aspekt sah Borkowski bei den meisten Schächten keine weiteren Hinweise auf die Abbauorganisation. Wegen der komplizierten Verknüpfung von Abbauförmigkeit und lokaler Geologie sind weder die Abstände zwischen den Schächten noch die Eigenschaften der Thiessenpolygone mit den Ergebnissen von Arnhofen vergleichbar. Dazu bedürfte es größerer Vorarbeiten mit einem GIS.

Nur bei der kompliziertesten Grubenform, den sogenannten ‘chamber mines’, sieht Borkowski weiter reichende Ordnungsstrukturen. Diese Abbauförmigkeiten sind der jüngsten Abbauphase um etwa 2800 v. Chr. zuzuordnen. Mit diesen Gruben wurden die tiefsten Bereiche des Flözes abgebaut. Sie bilden also die innerste ‘Zwiebelschale’, den ‘Innenrand’ des Bergwerks (a. a. O., 145ff.).

Bei der Anordnung dieser Gruben ist nun zu erkennen, dass es zwischen den ansonsten regelmäßig angeordneten Befunden immer wieder Streifen ungenutzter Flächen gab. Das 'U' der 'chamber mines' ist also in Segmente unterteilt. Diese Grenzen haben keinerlei geologische Ursachen. Innerhalb der Segmente liegen die Schächte zudem regelhaft näher bei einander, als sie es bei maximal möglicher Ausföhrung der Strecken könnten. Durch eine so dichte Schachtplazierung 'verschenkte' man also Arbeitszeit, denn man hätte die gleiche Fläche mit weniger Schächten und längeren Strecken abbauen können. Trotzdem beröhrten sich die Strecken nur sehr selten, was nach Borkowski nur möglich ist, wenn die Bergleute genaue Kenntnis vom jeweils benachbarten Schacht hatten bzw. wenn es sich um die gleiche Arbeitergruppe handelte (a. a. O. 147). Hier ist also in Bezug auf tradiertes Wissen wiederum das Gleiche zu beobachten, wie schon in Rijckholt und Arnhofen. Da in Krzemionki jeweils nur ein Flöz abgebaut wurde, man also die Weitungen immer auf gleichem Niveau vorantrieb ist dies besonders bemerkenswert.

Die innerste 'Schale' des Grubenfelds von Krzemionki weist also eine Aufteilung durch ungenutzte Streifen auf, die sonst bei keinem anderen Grubentyp zu beobachten ist. Innerhalb dieser Aufteilungen sind die Gruben ungewöhnlich dicht angeordnet. Dafür mussten die Bergleute jeweils die genaue Ausdehnung des bisherigen Abbaus gekannt haben.

Mit diesen Argumenten begründete Borkowski seine *Schachtgruppierungen*. Er unterschied so sechs Schachtgruppen, von denen drei aus sieben und drei aus elf Schächten bestehen. Entlang des U-Bogens der 'chamber mines', der in diesem Teil des Bergwerkes grob Nord-Süd verläuft, wechseln sich jeweils dreimal eine Gruppe aus sieben und eine Gruppe aus elf Schächten ab (a. a. O., 149 Fig. 130). Im Süden beginnt die Reihenfolge mit einer Siebenergruppe. Dann folgt eine Elfergruppe, dann wieder eine Siebener- und so fort bis die Reihe im Norden mit einer Elfergruppe endet. Bei der mittleren Siebenergruppe ist sogar die interne Chronologie der Gruppe zu erkennen.

Die Abfolge der einzelnen Schächte innerhalb der mittleren Siebener-Schachtgruppe ist an der Gestalt der Haldenhögel zu erkennen. Die Lücken in den Haldenkränzen um die Schachtmönder weisen stets in die Richtung eines anderen direkt benachbarten Schachtes. Aus den Ausgrabungen einiger Schächte war schon bekannt, dass man in Krzemionki ebenso wie in Arnhofen die Schächte direkt nach ihrer – allerdings mehrjöhriigen – Nutzung mit Abraum von einem neuen Schacht verfüllte (a. a. O., 147). Die Unterbrechungen in den ansonsten kreisrunden Haldenhögeln zeigen nun, aus welcher Richtung das Material zur Verfüllung des jeweiligen Schachtes kam. Sie weisen also jeweils auf den nächst jöhriigeren Schacht innerhalb der Gruppe. Danach bestand die Siebenergruppe aus zwei parallelen Zeilen von einmal vier und einmal drei Schächten. Die Anlage der sieben Schächte erfolgte im Zickzack (a. a. O., 149ff.).

Man begann im Norden der Gruppe mit dem ersten Schacht (Nr. 4/606), wendete sich mit einem weiteren (Nr. 639) nach Westen, dann wieder nach Süden (Nr. 607) und so fort. Diese Abbaustrategie bei den kugelamphorenzeitlichen Weitungsbauen in Krzemionki gleicht der bei den münchshöfenzeitlichen polygonen Gruppen in der Arnhofer Kiesgrube bis ins Detail (vgl. o. 2.1.6. Abb. 2.37: P 02, P 04 bes. P 03). Auch sie setzen sich aus zwei Zeilen zusammen, die parallel zum bisherigen Bergwerksrand lagen. Nach den spärlichen Informationen über den Verfüllungsrichtungen zu urteilen, wurden sie möglicherweise auch im Zickzack angelegt.

Angesichts dieser Ähnlichkeiten ist jedoch zu beachten, dass wie schon im Fall Rijckholt so auch in Krzemionki das Raumnutzungsmuster mit wesentlich größerer zeitlicher Tiefe verbunden ist als in Arnhofen. Wieder liegen zwischen den einzelnen Schritten Jahre bis Jahrzehnte: Borkowski nimmt an, dass eine 'chamber mine' durchschnittlich sieben Jahre in Betrieb war (ders. 1995, 148). Setzt man seine Zahlen um, ergibt sich, dass eine Siebenergruppe mindestens ca. 50 Jahre und eine Elfergruppe sogar über mindestens 80 Jahre benutzt wurde. Die von ihm erkannten Gruppen stehen demnach für eine Nutzungsregel, die über mehrere Generationen beibehalten wurde.

Wie schon in Rijckholt bildet in Krzemionki das Anlegen der Schächte in bestimmten *Ordnungsmustern* die Grundlage eines langfristigen Vorgehens, während diese Muster in Arnhofen ein immer wieder reproduziertes kurzfristiges Element im Rahmen einer längerfristig konzipierten Abbautätigkeit darstellten. In Arnhofen sind die Schachtverbände die Ordnungsmuster mit der größten zeitlichen Tiefe (s. o. 2.1.6. Abb. 2.38 und 2.1.7. Abb. 2.41). Diese Zeittiefe reicht aber nicht an die bei den Vergleichsplätzen beobachteten Zeitspannen heran.

Grundsätzlich kann man sagen, dass man bei den drei verglichenen Plätzen auf die *gleichen Strategien* stößt. Warum dies trotz unterschiedlicher Geologie sowie größeren zeitlichen und räumlichen Abständen zwischen Arnhofen, Rijckholt und Krzemionki zu beobachten ist, kann nur vermutet werden. Am wahrscheinlichsten ist jedoch, dass die soziale Ausgangssituation die gleiche war. In allen drei Fällen wollte jeweils eine relativ kleine Arbeits- bzw. Benutzergruppe ihren Teil eines Bergwerkes optimal ausnutzen. Zu denken ist hier in erster Linie an Familienverbände (Lineages) oder etwas größere soziale Gruppen, vielleicht die Bewohner einer Siedlung oder die Angehörigen einer größeren Allianzgruppe (vgl. u. 4.3.3.1.2.).

Während die Frage, wer hinter diesen *Benutzergruppen* steckte, nur spekulativ behandelt werden kann, gestattet die nächste Beobachtung wieder konkrete Einblicke. Die Grenzen zwischen den Schachtgruppen in Krzemionki liegen genau wie in Rijckholt und Arnhofen 'quer' zu den Zonen gleicher geologischer Bergbauvoraussetzungen.

In allen drei Fällen (Arnhofen, Rijckholt und Krzemionki) war also die Fläche so unterteilt worden, dass die Benutzer jedes Teiles jeweils auf die gleichen geologischen Bedingungen trafen. Es handelte sich demnach um mehrere gleichberechtigte (!) Menschengruppen. Zumindest konnten sie beim Bergbau Unterteilungen erreichen, die ihnen gleiche Voraussetzungen boten. Solche Unterteilungen der Bergwerksflächen wären selbst mit den modernen Methoden nicht sichtbar (vgl. o. 2.1.4.1.), wenn sie ad hoc bei jedem neuen Schacht neu ausgehandelt worden wären. Sie bestanden also jeweils schon zu Beginn des beobachteten Bergbaus. In allen drei Fällen, im münchshöfenzeitlichen Arnhofen, im michelsbergzeitlichen Rijckholt und im kugelamphorenzeitlichen Krzemionki handelten die Benutzergruppen also gleiche Nutzungsrechte heraus, an die sich ihre Nachfolger über mehrere Generationen hielten.

Dieser Befund hat weitreichende Konsequenzen für die Frage nach der *Arbeitsteilung* im Bergbau. Die Existenz unterschiedlicher, gleichberechtigter Benutzergruppen in den hier verglichenen jung- bis spätneolithischen Bergwerken belegt, dass selbst zu dieser Zeit keine Vollzeitspezialisierungen im Bergbau existierten. Bei Vollzeitspezialisierung hätten sich die Bergleute aus eigenem Interesse zu einem Monopolverband zusammengeschlossen, um nach Außen einheitlich aufzutreten und ihren Profit sichern zu können. Im Falle einer Benutzung durch eine einheitliche Gruppe hätte man also keine Unterteilungen der Abbauf Flächen finden dürfen. Bei einem vollzeitspezialisierten Bergbau wäre nur eine koordinierte Gruppe aktiv gewesen (zum Begriff der Spezialisierung s. u. 4.1.3.)! Aufgrund der Belege für mehrere gleichzeitig aktive Benutzergruppen pro Bergwerk muss man in Zukunft also bei sozioökonomischen Untersuchungen zum neolithischen Bergbau zunächst das Gegenteil – eine einheitliche agierende Benutzergruppe – nachweisen, bevor man bei seinen Überlegungen eine Vollzeitspezialisierung in Erwägung zieht. Die oben vorgestellte Kombination aus geographisch-statistischen und punktfeldstatistischen Methoden erlaubt es (s. o. 2.1.4.), diese Aspekte mit objektiven Methoden anhand konkreter Daten zu überprüfen.

Im Hinblick auf die *Kontrolle* des Bergbaus ist in Krzemionki noch auf einen besonderen Aspekt hinzuweisen. Die komplizierteren Grubenformen ('chamber mines') hätten, da sie zum größten Teil durch standfesten Fels gehauen worden waren, noch Jahrzehnte offen stehen können. Durch das Verfüllen der aufgelassenen Schächte war der Zugang zum Flöz aber nur über die jeweils aktiven Schächte möglich. Nach Borkowski stellten die Bergleute so sicher, dass nur sie allein den Zugang zum Flöz kontrollierten (BORKOWSKI 1995, 147). Zumindest in Krzemionki versuchten die einzelnen Benutzergruppen also sehr wohl, Dritten den Zugriff auf das Rohmaterial zu verwehren. Das spricht dafür, dass dort nur Berechtigten die Nutzung erlaubt war.

In Arnhofen könnte dieser Aspekt mit der Gefährlichkeit des Bergbaus verknüpft worden sein: Wer sich nicht auskannte, riskierte in Arnhofen beim Durchgraben der Schotterschichten sein Leben. Der Bergbau war also hier nur Eingeweihten gefahrlos möglich und zusätzliche Maßnahmen zum Ausschluss Dritter waren daher gar nicht nötig.

Der letzte Vergleichsplatz ist das nordfranzösische Bergwerk auf dem Plateau Haut-Chateau beim Dorf *Jablins* in einer Schleife der Marne ca. 50 km östlich von Paris (BOSTYN/LANCHON 1992).

Im Vorfeld des Baus einer Schnellbahntrasse wurde in den Jahren 1989 und 1990 auf einem 50 m bis 70 m breiten und etwa 500 m langen Streifen ein Ausschnitt aus einem insgesamt annähernd kreisrunden, ca. 500 m durchmessenden jungneolithischen Bergwerk ausgegraben. Man erfasste damit etwa 20 % der Bergwerksfläche, wobei insgesamt 766 Gruben zum Vorschein kamen (a. a. O., 89). Insgesamt dürfte das Bergwerk demnach knapp 4000 Gruben umfassen. In Jablins treten Grubenformen auf, die in das Kontinuum zwischen einfachen Pinggen einerseits und komplexen Duckelbauen andererseits einzuordnen sind (a. a. O., 59ff.). Einfache Duckelbaue stellen bei weitem die Mehrheit.

Aufgrund der großflächigen Ausgrabung kann man hier in einem ersten Arbeitsschritt die *Schachtdichte* mit Arnhofen vergleichen. Sie erreicht maximal 8 Schächte pro Ar (a. a. O. 89 Fig. 76). In Arnhofen liegen die Maximalwerte dagegen bei über 30 pro Ar (vgl. u. 2.3.). Allerdings ist der durchschnittliche Schachtdurchmesser in Jablins mit 2,83 m mehr als doppelt so groß wie in Arnhofen (vgl. a. a. O. 66, Fig. 44). In Niederbayern beträgt der durchschnittliche Maximaldurchmesser von 136 Schächten in ca. 4 m Tiefe nur 1,01 m. Die Verdoppelung dieses Maßes bedeutet aber eine Vervierfachung des Flächenverbrauches. Der Flächenverbrauch der zu platzierenden Objekte war in Jablins also mindestens viermal so groß. Bei gleicher Dichte sollten daher viermal weniger Schächte pro Ar vorhanden sein. Und tatsächlich verhalten sich die maximalen Schachtdichten mit einem Verhältnis von 8 zu 30 oder 1 zu 3,75 in etwa in diesem Sinn. Ein Schacht in Arnhofen entspricht demnach vom Flächenverbrauch 0,27 in Jablins ($1:3,75 = 0,266$). Da die Schachtdurchmesser in Jablins sogar mehr als doppelt so groß sind wie in Arnhofen, sollte die Dichte eigentlich noch geringer sein, als ein Viertel des Arnhofener Wertes, also deutlich unter der Ration von 0,25 liegen. Eine Zahl von 0,27 bedeutet daher, dass die maximale Schachtdichte in Jablins eigentlich sogar etwas höher ist als in Arnhofen.

Bisher war in Arnhofen die Situation bei der *Abbauintensität* pro Fläche ohne Vergleichswerte schlecht abschätzbar.

Der Vergleichsplatz Jablines zeigt, dass es durchaus jungneolithische Bergwerke gibt, wo, relativ gesehen, die Flächennutzung beim Abbau sogar noch etwas intensiver war. In Bezug auf die durchschnittliche räumliche Abbauintensität ist Jablines also ein gut vergleichbares Pendant.

Wie bei den zeitgleichen Forschungen in Krzemionki untersuchte man auch in Jablines die Schachtverteilung mit einer *Tesselierung* (a. a. O. 90ff. und Beilage Fig. IIb). Dabei wurde jedoch nicht wie in Krzemionki das volle Potential der Methode ausgenutzt. In Jablines arbeitete man weder konsequent mit den Flächen der Thiessenpolygone noch mit den Abständen zwischen den direkt benachbarten Schächten – also den Triangulationslinienlängen.

Den Mangel an Vergleichbarkeit könnte man beheben, indem im GIS eine entsprechende eigene Aufbereitung der Daten vorgenommen wird. Da sich die hier verwendeten Untersuchungsmethoden auf nachdigitalisierte Pläne anwenden lassen, ließen sich somit auch für die französischen Daten Vergleichswerte erzeugen. An dieser Stelle ist jedoch nicht der Platz dafür.

Anstatt nun allgemein gebräuchliche Kennwerte wie etwa die durchschnittliche Flächengröße zu erzeugen, wurde ein abgeleitetes und daher nicht vergleichbares Maß, der sogenannte “Eigendurchmesser“ gebildet (franz. “diamètre propre“). Damit wird der Mittelwert aus Umkreis und Inkreis der Polygone bezeichnet. Der Umkreis umschreibt ein Thiessenpolygon so, dass er den am weitesten entfernten Polygonknotenpunkt schneidet, während der Inkreis so um den Polygonmittelpunkt gelegt wird, dass er nur die nächstliegende Polygonseite tangiert.

Die am häufigsten vorkommenden Werte dieses “Eigendurchmessers“ liegen bei 6,6 m bis 7 m. Nach der beigelegten Tabelle zu urteilen (vgl. a. a. O. 95 Fig., 79 unten), verbergen sich hinter der dafür zusammengefassten Schachtmenge aber mindestens zwei, wenn nicht sogar drei unterschiedliche univariate Verteilungen (vgl. 2.1.4.3.). Das auf 0,4 m Klassen aufgelöste Histogramm weist nämlich zwei weitere lokale Gipfel auf, die beiden bei 7,2 m bis 7,6 m und 8,6 m bis 9 m liegen. Welches Phänomen dahinter stehen könnte, ist nicht zu erkennen, da die Kartierung mit einer Einteilung in 0,5 m Klassen arbeitet (vgl. a. a. O. 95, Fig. 79 oben). Das erschwert es, die Informationen aus dem Histogramm mit der Karte zu verbinden. Daher lassen sich trotz der prinzipiellen Vergleichbarkeit von Jablines und Arnhofen keine weitergehenden quantitativen Vergleiche zu diesen Fragen durchführen.

Die Tesselierung wurde in Jablines auch dazu benutzt, um auf intuitivem Wege zwei Arten von Polygonanordnungen mit der *Gruppierung von Schächten* gleichzusetzen (vgl. a. a. O. 93ff.). Die eine Interpretationshypothese geht davon aus, dass solche Schächte zu einer organisatorischen Gruppe gehören, die sich um einen “Kern“ aus sechseckigen oder annähernd rechteckigen Polygonen herum anlagern.

Auf diese Weise konnte man 12 Gruppen bilden. Dabei umfassten die vollständig in der Untersuchungsfläche liegenden Gruppen zwischen 6 und 23 Schächte. Zusätzlich zu diesen unerwarteten Größenschwankungen zeigen sie auch keinerlei weitergehende strukturelle Ähnlichkeiten, wie etwa gleiche Art der Schachtanordnung. Eine kontinuierliche Abbauorganisation kann also ausgeschlossen werden, denn es handelt sich nicht um ein Raumnutzungsmuster, das über längere Zeiträume hinweg beibehalten wird (vgl. o. 2.1.4.). Die sichtbaren Ähnlichkeiten der Gruppen sind vielmehr das Ergebnis der Eigenschaften, aufgrund derer die Polygone zu Gruppen zusammengefasst wurden. Deshalb könnte es sich auch um artifizielle Ergebnisse handeln.

Zwei weitere Gruppen bildete man aus kreisförmig angeordneten, langgestreckten Polygonen, bei denen in der Mitte der Anordnung jeweils ein besonders großes Polygon zu liegen kam. Das führt zu einer Anordnung in Form von Blütenblättern. Besonders an diesem Vorgehen kann man unschwer erkennen, dass hier ein grundsätzliches Missverständnis der Methode der Tessellierung vorliegt. Derartige ‘Blütenmuster‘ aus kreisförmig angeordneten, langgestreckten Polygonen entstehen dann, wenn die tesselierten Objekte im Kreis um eine überdurchschnittlich große Freifläche zwischen den Objekten angeordnet sind. Solche ‘Löcher‘ in einer Anordnung sind aber gerade das Ergebnis von Brüchen in einer kontinuierlich nach bestimmten Regeln fortgeführten Platzierung von Objekten (vgl. o. 2.1.4.)! Ähnliches gilt natürlich auch für alle langgestreckten Polygone, die sich um “Kerne“ aus sechseitigen Polygonen anlagern. Denn die langgestreckte Form entsteht ja, wenn in einer Richtung die Schächte jeweils sehr nah beieinander liegen, während sie senkrecht dazu sehr weit voneinander entfernt sind. Auch hier handelt es sich eigentlich um Unregelmäßigkeiten in der Verteilung. Solche Polygone entstehen nämlich dann, wenn neben bestehenden Objekten neue in ungewöhnlich kurzer Distanz angelegt werden, kurz, wenn ein bestehendes Muster durch spätere Eingriffe gestört wird! Die Gruppenbildung basiert also auf einem Missverständnis der Methoden-Arbeitsweise.

Den Umriss der Polygone und ihre Lage zueinander nach intuitiven graphischen Gesichtspunkten zur Gruppenbildung zu benutzen, ist – so dürfte im Laufe dieser Studie klar geworden sein – kein geeignetes Mittel, um räumliche Ordnungsmuster zu erkennen. Man schöpft damit auch die Möglichkeiten der quantitativen Auswertung nicht aus. Die erste Variante der intuitiven Gruppenbildung in Jablines ist demnach nicht geeignet, um zu Vergleichen herangezogen werden.

Für die *Alternativhypothese zur Schachtgruppierung* stützten sich Bostyn und Lançon auf gleich große Abstände zwischen mehreren Schächten (vgl. a. a. O., 94 und 95 Fig. 80 B). Dafür benutzten sie die Distanzen zwischen direkt benachbarten Schächten, also die Triangulationslinien, gingen aber nicht weiter darauf ein.

Muster aus voneinander gleich weit entfernten Schächten sahen sie in Anordnungen von drei im Dreieck liegenden Befunden verwirklicht. Auf diese Weise bildeten sie 21 Schachtgruppen, wovon einmal 2, einmal 3, einmal 5 und schließlich einmal 11 Gruppen in größeren Verbänden nebeneinander zu liegen kamen. Obwohl die Bearbeiter an anderer Stelle Fälle von linear in annähernd gleichem Abstand angeordneten Schächten beschreiben (a. a. O., 65 und 67 Fig. 45 B), wurden die beiden Aspekte nicht kombiniert.

Die Dreiergruppen in Jablines sind aus Arnhofener Sicht die minimale Umsetzung des Prinzips einer polygonen Gruppe. In der Tat gibt es in Arnhofen mit der Gruppe P 01 in der Kiesgrube eine exakte Entsprechung (s. o. 2.1.6. Abb. 2.36). Diese Gruppe liegt allerdings so nahe am Rand der Grabungsfläche, dass weitere zugehörige Schächte nicht ausgeschlossen werden können. Bemerkenswert ist zudem, dass es in Jablines keine einzige einzeln liegende Dreiergruppe gibt, sondern dass alle diese Gruppen jeweils zu anderen gleichartigen Anordnungen direkt benachbart sind. Dadurch kommen die oben erwähnten vier Verbände zustande, wovon sich der größte mit seinen 11 Schachtgruppen über insgesamt mehr als 10 Ar erstreckt. In der Zahl ihrer Elemente entsprechen sie damit ungefähr den Schachtverbänden in Arnhofen (s. o. 2.1.6. Abb. 2.38). Bostyn und Lanchon weisen zudem darauf hin (dies. 1992, 94), dass eine auf Dreiecksanordnungen basierende Raumnutzungsstrategie eine optimale Nutzung der Fläche erlaubt. Wahrscheinlich verbirgt sich hinter dem Ergebnis der intuitiven Alternativhypothese ein Areal, bei dem ähnlich wie in Arnhofen immer mehrere Schächte in gleichem Abstand zueinander liegen. Nach dem oben diskutierten Zusammenhang zwischen der Flächennutzungsoptimierung sowie der Existenz von Planungsmustern und begrenzten Flächen kann man daher auch für Jablines grundsätzlich von der Existenz einer unterteilten Bergwerksfläche ausgehen (vgl. o. 2.1.4.). Wie diese Unterteilung jedoch genau aussieht, könnten erst zusätzlich geostatistische Untersuchungen der Daten von Jablines erweisen. In jedem Fall scheint es zwischen Arnhofen und Jablines grundlegende Ähnlichkeiten bezüglich der Abbauplanung gegeben zu haben.

Besonders interessant ist es in diesem Zusammenhang, dass die Bearbeiter tatsächlich eine *Gruppierung von Schächten* nicht weiter beachteten, obwohl sie ein regelmäßiges Muster mit gleichen Abständen bildeten (a. a. O., 65 und 67 Fig. 45 B). Diese Schächte lassen sich zu einer Gruppe zusammenfassen, die denen in Rijckholt zum Verwechseln ähnlich sieht. Das ist bemerkenswert, weil der Bergbau in Jablines und Rijckholt archäologisch als gleichzeitig anzusehen ist und beide Plätze nur 300 km auseinanderliegen.

Die Schachtgruppe von Jablines, die sich durch gleiche Abstände zwischen 3,5 m und 4 m auszeichnet, kann man noch mit einer Hypothese zur *Ausbreitung* des dortigen Abbaus verbinden.

Nach den Ergebnissen der ^{14}C -Datierungen breitete sich in Jablines der Bergbau in etwa von Süd nach Nord über die Fläche aus (PAZDUR 1992), also hangabwärts (vgl. BOSYTYN und LANCHON 1992, 216 Fig. 214). Man kann daher für die Schächte der Gruppe eine Abfolge postulieren, bei der nach einem 'Startschacht' im Norden dreimal Schächte jeweils in gleichem Abstand zu ihrem direkten Vorgänger angelegt wurden. Sie folgten einander in einer Art Zickzackmuster. Ausgehend vom vierten Schacht wurde dann senkrecht zur Hangneigung mit zwei weiteren Schächte eine Linie gebildet. Im rechtem Winkel zu dieser Achse wurde, ausgehend vom mittleren Schacht der bestehenden Linie, hangabwärts eine neue Linie angelegt, die wieder senkrecht zur Hangneigung orientiert war. Schließlich wurde ein letzter Schacht in gleichem Abstand noch einmal hangabwärts vorgeschoben.

Die Form dieser Schachtgruppe in Jablines ähnelt nicht nur der Gruppe in Rijckholt, sie ist auch der Situation in Arnhofen sehr ähnlich. Würde man dort mehrere lineare und polygone Gruppen zu einer zusammenfassen, so kämen beinahe gleichartige Strukturen zustande. Hier ist wieder daran zu erinnern, dass sich das Vorgehen bei der Gruppenbildung in Arnhofen strikt an bestimmten Prinzipien orientierte (s. o. 2.1.5.). Sowohl die Situation in Rijckholt als auch die in Jablines legen also nahe, dass die neolithischen Bergleute manchmal etwas ungenauer bei der Einhaltung ihrer Maßgaben waren. In Arnhofen werden also möglicherweise Schächte, die von den Bergleuten nur etwas ungenauer plaziert wurden, nicht der gleichen Schachtgruppen zugewiesen bzw. überhaupt nicht als Gruppe angesehen. Dieses Problem ist aber nicht methodisch sauber zu lösen. Würde man das in Arnhofen praktizierte Vorgehen großzügiger handhaben, stünde man schließlich wieder mit subjektiven Einschätzungen zur Schachtgruppierung da – und verlöre so die argumentative Grundlage.

Der Vergleich mit Jablines zeigt zwei wichtige Aspekte des *jungsteinzeitlichen Bergbaus*. Er belegt zunächst, wie extrem sorgfältig die Bergleute in Arnhofen bei ihren Vermessungen arbeiteten. Man kann also von großer Ähnlichkeit bei den Raumnutzungskonzepten in Arnhofen und in Jablines ausgehen. In Jablines wurde allerdings ein derartiges Ordnungsmuster nur ein einziges Mal im Detail beschrieben. Strenggenommen ist es also unklar, ob man hier von einem Einzelfall ausgehend verallgemeinert. Bedenkt man jedoch die bisher angeführten Vergleiche mit Rijckholt und Krzemionki und die oben für die Auswirkungen des Zufalls postulierten Effekte, so dreht sich die Beweislast um. Man müsste eigentlich geostatistisch überprüfen, wie hoch bzw. niedrig die Wahrscheinlichkeit für ein solches Muster denn wäre, wenn es sich um einen zufälligen Einzelfall handeln würde. Man kann daher festhalten, dass die Ähnlichkeit bei der Bergbauorganisation zwischen Jablines und Arnhofen sogar noch größer ist, als oben schon vermerkt.

Ein weiterer interessanter Befund in Jablines betrifft die *Abbaugeschwindigkeit*. Pazdur setzt voraus, dass die Schächte jeweils durch das Datum der aus ihnen entnommenen ^{14}C -Probe datiert würden (vgl. ders. 1992). Das erlaubt es ihm, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Bergbaues zu beurteilen. Danach lag sie aufgrund der zahlreichen, über einen Raum von 400 m streuenden Daten, bei etwa 190 m pro Jahrhundert. Da die Gruben im Schnitt in einem Abstand von etwa 7 m lagen (vgl. BOSYTYN und LANCHON 1992, 95 Fig. 79), entspricht dies etwa 27 Vorverlagerungen um jeweils eine Grube innerhalb eines Jahrhunderts, also knapp eine Grube in vier Jahren (genau: alle 3,7 a).

Bemerkenswert ist an dieser Stelle, dass für die Duckelbaue in Krzemionki, die in ihrer Größe und Form den französischen stark ähneln, eine durchschnittliche Nutzungsdauer von drei Jahren angenommen wird (s. o.). Geht man für Jablines von einer Laufzeit von 600 Jahren aus, so ergibt sich bei insgesamt etwa 4000 Schächten (s. o.) nur eine Bergbauaktivität im Umfang von 7 Schächten pro Jahr ($4000:600 = 6,66$). Betrachtet man zusätzlich die spätere Nutzungsphase zwischen 3200 und 3000 als gleich intensiv, so sinkt dieser Wert sogar auf nur 5 Schächte pro Jahr ab ($4000:800 = 5$). Wenn schließlich eine gleichbleibende Abbauintensität seit der frühmittelneolithischen Gruppe Villeneuve-Saint-Germain (ca. 4900 v. Chr. bis 4700 v. Chr.) erwogen wird, so ergibt sich bei 1500 Jahren Nutzungszeit nur noch eine Abbauintensität von 3 Schächten pro Jahr ($4000:1500 = 2,66$). In jedem Fall ist die Zahl der durchschnittlich pro Jahr neu angelegten Schächte geringer als zehn. Sie bewegt sich damit in einem Bereich, der gut mit den bisher beobachteten Abbauintensitäten zu verbunden ist. Für einen vollzeitspezialisierten, arbeitsteiligen Bergbau sind dies viel zu kleine Werte. Auch in Jablines kann man also alleine aufgrund der Quantitäten einen Bergbau in Vollzeitspezialisierung ausschließen (vgl. u. 2.3.).

Abschließend ist festzuhalten: Aufgrund der archäologischen Quellen zur *Organisation des Bergbaus* lassen sich bei keinem der Vergleichsplätze Anhaltspunkte für Vollzeitspezialisten im Bergbau finden. Im Gegenteil, alle verfügbaren Hinweise weisen auf saisonal ausgeführte Aktivitäten von neolithischen Bauern hin. Die Belege reichen von der Aufteilung der Bergwerksflächen und bis zur Größe der Benutzergruppen. Durch die Planungsmuster wird zudem die Existenz von Zugangsbeschränkungen hochwahrscheinlich (vgl. SACK 1986, 35 Fig. 2.1).

Wie mehrmals betont, können alle diese Erkenntnisse aber nicht direkt mit der Abbauorganisation in der *frühmittelneolithischen Hochphase* Arnhofens verbunden werden. Sie beweisen allerdings, sollte es jemals vor dem Jungneolithikum Vollzeitbergleute gegeben haben, so war dieses Phänomen bereits wenige Jahrhunderte später im 43. Jh. v. Chr. wieder verschwunden. Es entstand auch während der folgenden etwa 1400 Jahre nicht noch einmal in Mitteleuropa.

Wer entgegen dieser Erkenntnisse doch eine soziale Arbeitsteilung für das Arnhofen des frühen 5. Jts. annehmen will (vgl. auch u. 4.3.2.ff.), der muss neben Gegenargumenten also auch noch eine nachvollziehbare Erklärung für das entwicklungsgeschichtlich folgenlose Verschwinden dieser Arbeitsteilung liefern.

Die folgenden Teile dieser Studie (3. und 4.3.) werden zeigen, dass es auch für das Mittelneolithikum keinen einzigen zwingenden Hinweis auf Vollzeitbergleute, -steinschläger oder Händler gibt. Auch im Fall Arnhofen sind vielmehr alle Quantitäten gut mit einem historischen Bild vereinbar, nach dem es sich beim Bergbau um saisonal oder in größeren Abständen betriebene Teilzeitaktivitäten handelte, die von benachbarten Verwandtschafts- oder Siedlungsgruppen ausgeführt wurden. Man betrieb den Bergbau neben der Landwirtschaft in den an freier Zeit reicheren Abschnitten des bäuerlichen Arbeitsjahres. Er besaß mit Sicherheit keinerlei Ähnlichkeit mit den oft vorschnell entworfenen Modellen eines quasi 'industriell' organisierten Bergbaus (vgl. u. 4.3.3.1.2.).

2.2. Fundverteilung in der Halde

Die bisherige Untersuchung der räumlichen Organisation des Abbaus erfolgte anhand der Verteilung von Befunden. Aus den statistischen Eigenschaften der rekonstruierten Lage der Schachtmittelpunkte ergab sich, dass die Organisation der Raumnutzung auf den bisher untersuchten Grabungsflächen sowohl Planung als auch genaue Vermessung umfasste.

Man kann die Frage nach der räumlichen Organisation aber noch ganz anders angehen, indem man die *Verteilung von Funden* als einen indirekten Indikator der Raumnutzung ansieht. Dafür dürfen die Stücke aber nicht durch Prozesse verlagert worden sein, die nichts mit dem Bergbau zu tun hatten. Funde, die mit dem Bergbau in Verbindung stehen, sind in der Bergwerkshalde – also in den Schichten nahe der Oberfläche – in enormen Mengen vorhanden. Eine neolithische Bergwerkshalde umfasst alle oberirdisch sichtbaren Reste des Bergbaus sowie alle Schichten, die auf obertägige Aktivitäten zurückgehen. Dazu können auch Straten gehören, die heute z. T. über einen Meter unter der Oberfläche liegen. Will man die Raumnutzung während des Bergbaus anhand von Funden untersuchen, muss man sich auf Artefakte aus ungestörten Schichten konzentrieren. Wie auch bei anderen neolithischen Bergwerken treten in Arnhofen riesige Fundmengen auf. Es handelt sich um Stücke, die bei den vor Ort stattfindenden Eignungstests der Hornsteinknollen und -platten sowie bei den Kernvorpräparationen zu Abermillionen anfielen. Es handelt sich vor allem um Abschläge und Trümmer, seltener um Klingen oder Kerne bzw. verworfenen Rohstücke (vgl. u. 3.2.2. Tab. 3.15). Es wird noch gezeigt werden, dass die Angaben zur Fundmenge keine Übertreibung darstellen.

Die Verteilung einer extrem zahlreichen Fundkategorie ist ein geradezu idealer Indikator für die Raumnutzung, da hier wiederum quantitative Methoden zur Anwendung kommen können, und man Interpretationen auf objektive Auswertungsschritte gründen kann. Andere Funde, wie etwa Bergbauwerkzeuge etc. sind für diese Fragestellung nur sehr bedingt geeignet.

Wenn man sowohl die räumliche Verteilung von Befunden als auch die von Funden untersuchen kann, wird der *Vergleich* der Auswertungsergebnisse besonders interessant. Stellen doch die quantitativ erfassten Funde eine völlig andere Quellengattung dar, als die einzeln dokumentierten Schächte. Die Funde sind indirekte Hinweise auf die Raumnutzung, da sie in den oberflächennahen Schichten durch menschliche Aktivitäten verteilt wurden. Die Befunde sind dagegen direkte Überreste der Raumnutzung. Bei der Ausgrabung wurden sie zudem meist erst in einer gewissen Tiefe unter der Oberfläche erfasst. Die beiden Quellen spiegeln also auf ganz unterschiedliche Art und Weise die gleichen Aktivitäten wieder.

Aufgrund des ganz unterschiedlichen Bezuges zwischen den beiden Untersuchungsobjekten und der Raumnutzung, müssen daher sich gegenseitig bestätigende Ergebnisse als besonders aussagekräftig angesehen werden, während indifferente Resultate nicht unbedingt als Widerspruch aufzufassen sind.

Will man anhand einer Fundverteilung *räumliche Prozesse* erforschen, sollten die dabei untersuchten Flächen wesentlich größer sein, als der vom untersuchten Prozess in Anspruch genommene Raum. Handelt es sich beispielsweise um mehrere nebeneinander liegende Phänomene, sollte die Untersuchungsfläche soviel größer als das einzelne Phänomen sein, dass ihre Ränder mit hoher Sicherheit benachbarte, und nicht mehr das im Zentrum liegende Phänomen erfassen. Nur so kann eine Verteilung vollständig untersucht werden. Wird nur ein Befund und eine Konzentration ausgegraben, beispielsweise ein Schachtmund, lassen sich nur schwer verallgemeinerbare Aussagen machen. Außerdem weiß man nicht, inwieweit das Ergrabene durch benachbarte Schächte bzw. Konzentrationen mit beeinflusst ist.

In Arnhofen war durch die *Altgrabung* und Beobachtungen aus dem Spätwinter 2001 bekannt, dass die Schachtmünder nahe der Oberfläche Durchmesser von zwei Meter und mehr erreichen können. Man benötigte also eine Fläche, die wesentlich größer als 2 m Kantenlänge im Quadratmaß. Angestrebt wurde daher, einen mindestens 6 m im Quadrat messenden Haldenbereich auszugraben. So sollte es möglich sein, etwa 3 mal 3 Befunde anzuschneiden und mindestens einen und die ihn umgebende Fundverteilung vollständig zu erfassen.

Bei der Artefaktverteilung muss wie gesagt gewährleistet sein, dass später keine natürlichen oder anthropogenen Verlagerungen auftraten. Bereits bei der Grabung der 1980er Jahre hatte man in 6 Schnitten anthropogene Schichten zwischen dem rezenten Oberboden und den ungestörten Altbensschottern beobachtet (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 11 Abb. 8 und Beilage 1 unten). Aus diesen wurden damals über 2,4 t an Silexartefakten^{2.13} und Manuporten geborgen (BINSTEINER 1990, 31ff.).

^{2.13} Zwar werden die Stücke nicht als Artefakt bezeichnet, aber durch den Text ist klar, dass es sich um Artefakte ("Absplisse, -Fragmente") handelt (BINSTEINER 1990, 31ff.). Vermutlich verstanden die damaligen Bearbeiter unter "Artefakt" nur Stücke einer gewissen Größe, die nach einer typologischen Auffassung als Abschlag, Klinge und Kern betrachtet werden. Wenn diese Vermutung zutrifft, so ist andererseits nicht ganz klar, ob überhaupt, und wenn, ja wieviele von den Stücken reine Manuporte sind, also in keiner Weise vom Menschen veränderte Rohstücke. Ihre Zahl wird nicht angegeben; teilt man die Gewichtssumme durch das Durchschnittsgewicht der hier untersuchten Funde (3,1 g) ergibt sich ein Wert von etwa 770 000 Artefakten! Zum Vergleich: In diesem Abschnitt wurde die Verteilung von etwa 121 000 Stücken untersucht (s. u.).

Nachdem im März 2001 erkannt wurde, dass auch im Bereich der aktuellen Grabung die Halde des Bergwerkes nicht erodiert war, entstand die Überlegung, mögliche räumliche Strukturen im Bereich der Schächtmünder anhand der Fundverteilung auf einer eigens dafür angelegten Fläche zu untersuchen (zur Lage s. o. Kap. 2.1.1. Abb. 2). Eine spätere bodenkundliche Untersuchung (Gutachter Prof. Dr. J. Völkel, Universität Regensburg 2001; VÖLKELE/LEOPOLD 2001) bestätigte, dass die oberflächennahen Schichten des Bergwerks nie von einer nachweisbaren Erosion betroffen waren (s. o. 1.4.).

Die *Haldenschichten* unterhalb des Pflughorizontes waren (und sind) höchstwahrscheinlich vollständig erhalten. Auch Winderosion durch Ausblasung von Sanden ist für diese Schichten auszuschließen. Es könnten höchstens noch bodenchemische Prozesse gewirkt haben, bei denen Schichtbestandteile aufgelöst und Funde verlagert wurden. Das ist aber höchst unwahrscheinlich, da die aus Quarz und Quarzit bestehenden Sande und Kiese im Normalfall nicht so angegriffen werden (vgl. GRÜNDER 2003), dass sie sich zersetzen. In Zusammenhang mit der nachbergbauzeitlichen Bodenbildung traten nur Veränderungen bei den (färbenden) Bodenmineralien und eine Verlagerung der Ton- und Feinkornfraktion auf (VÖLKELE/LEOPOLD 2001). Diese Suffosion dürfte vor allem durch das Versickern der Niederschläge im Bereich der Schachtverfüllungen hervorgerufen worden sein (vgl. LESER 1993, 107). Die Haldenlandschaft wurde erst bei der postneolithischen Einebnung durch den Ackerbau verändert, der im Bereich der Ausgrabungen aber längere Zeit nach dem Bergbau einsetzte (vielleicht in der Bronzezeit?). Unmittelbar nach dem Bergbau ist eine länger andauernde Wiederbewaldung anzunehmen, da die Bodenqualität für prähistorischen Ackerbau unattraktiv war. All diese Prozesse beließen die Funde in situ. Die Haldenbereiche unterhalb des Pflughorizontes wurden nur sehr selten durch *postneolithische Bodeneingriffe* gestört. Wo man keine späteren Eingriffe feststellen kann, ist also die Fundverteilung in diesen Schichten ein vollständig erhaltenes Abbild der prähistorischen Artefaktverteilung nach Aufgabe des Bergbaus – sieht man von möglichen Baumwürfen des auf den Grabungsflächen stockenden Kiefernwaldes ab.

Um eine *Untersuchung der Artefaktverteilung* durchzuführen, musste erst ein möglichst großes Areal gefunden werden, auf dem keine größeren Baumstümpfe zu entfernen waren. Dies gelang auf der als "Feld 1" bezeichneten Fläche unmittelbar östlich der befundorientierten Haldengrabung (**Abb. 2.42**). Hier wurde die Fundverteilung mit einer 95,25 m² großen Ausgrabungsfläche untersucht. Im Folgenden wird diese Fläche auch als "fundorientierte Haldengrabung", "Feld 1" oder "Planum 1 bis 2 nord / ost" bezeichnet.



Abb. 2.42: Abensberg-Arnhofen. Blick über die fundorientierte Haldengrabung (das sog. Feld 1); der Blick geht nach Nord zur Siebstation und zeigt den Arbeitsstand Ende Juli 2001. Im Hintergrund erkennt man Gebäude und Fläche der Baumschule.

Das erste Planum wurde nach dem Abschieben des rezenten Waldbodens und des subrezentem Pflughorizontes in etwa 0,3 m Tiefe angelegt. Es zeigte noch keine verwertbaren Befunde. Allerdings waren auch keine natürlichen Pseudobefunde wie etwa Baumwürfe zu beobachten. Man kann daher davon ausgehen, dass *die hier ausgewertete Fundverteilung auf prähistorische menschliche Aktivitäten zurückgeht, die im Zusammenhang mit dem Bergbau standen.*

Nach der Dokumentation des Planums wurde der folgende, ca. 0,25 m mächtige *Abhub* gesiebt und die anfallenden Funde nach Viertelquadratmeter-Einheiten geborgen. Die untersuchte Schicht erstreckt sich also bei ca. -0,3 m bis ca. -0,55 m Tiefe. Mit diesem Vorgehen wurde die Unterkante der Halde nicht erreicht. Ein weiterer Abhub war aus Zeitgründen nicht mehr möglich. Die geborgenen Silices stellen daher nur einen Teil der Stücke dar, die pro Haldenfläche vorhanden sind. Schätzungsweise wurde etwa ein Drittel der Haldenmächtigkeit in diesem Bereich untersucht. Das zweite Drittel der Haldenschichten lag über dem untersuchten Niveau und war vom subrezentem Pflughorizont und der rezenten Waldbodenbildung beeinflusst. Hier ist die Fundverteilung dementsprechend gestört. Das letzte Drittel schließlich lag tiefer als der vorgenommene Abhub. Festzuhalten ist: *Die hier untersuchte Fundverteilung beschreibt vor allem die Lage der Stücke oberhalb der Schachtmünder im mittleren Drittel der Haldenschicht.*

Alle Funde wurden nach Viertelquadratmetern getrennt ausgezählt und gewogen. Es handelt sich insgesamt um 121.019 Silexartefakte größer/gleich 5 mm. Sie entstammen ca. 23,8 m³ oberflächennahen, ungestörten Haldenschichten. Ihr Gesamtgewicht beträgt 369,723 kg.

Dass hier Funde mit erfasst wurden, die sonst als zu klein verworfen werden (Stücke von 5 mm bis 10 mm), liegt in der Fragestellung begründet. Auch diese Stücke sind Ergebnis menschlicher Handlungen und auch ihre Lage ist Ergebnis der Raumnutzung.

Die angetroffenen *Artefaktmengen* scheinen nach den von Binsteiner vorgelegten Zahlen allgemein für die Bergwerkshalde repräsentativ zu sein (vgl. ders. 1990). Sein Haldenschnitt Nr. 1 besaß eine Fläche von 50 m². Dort fanden sich zwischen der Oberfläche und ca. 0,6 m Tiefe mindestens 409,05 kg Silex (a. a. O., 16 und 36 Tab.7)^{2.14}. Dieses Schichtpaket besaß im Vergleich zum hier untersuchten Bereich also die doppelte Mächtigkeit bei ungefähr der halben Fläche. Betrachtet man nur die Funde aus den Niveaubereichen, die etwa den hier untersuchten Schichten entsprechen, so ergibt sich ein Gewicht von 256,75 kg (81,9 kg / Planum 1–2 und 174,85 / kg Planum 2-3). Zum genauen Niveau seiner Plana 1 und 2 machte Binsteiner keine Angaben. Rechnet man diese Werte Binsteiners auf 95,25 m² hoch, so erhält man 489,1 kg Silex für einen Haldenausschnitt mit 95,25 m². Die Differenz zur hier vorliegenden Menge beträgt 119,4 kg. Ein Blick auf die von Binsteiner vorgelegte Gewichtsverteilung zeigt, dass in seinem Schnitt scheinbar auch schwerere Stücke auftraten (taubes Rohmaterial oder negativ getestete Rohstücke). Der größte Gewichtsanteil (174,85 kg bzw. 53,2 %) kam aus einer tieferen Schicht zwischen seinem Planum 2 und 3.

Nach der einzigen Abbildung zum *Aussehen der Halde* zu schließen, erfasste man während der Altgrabung vor allem das Niveau der trichterförmigen Schachtmünder und kaum die anthropogen umgelagerten Haldenschichten, die die Münder bedeckten (ENGELHARDT/ BINSTEINER 1988, 10 Abb. 8). Diese Schichten besaßen nur eine Mächtigkeit von vier bis sechs Dezimetern. In den darunter ansetzenden Schachtmündern fanden sich in großer Menge verworfene Rohstücke und negativ getestete Platten und Knollen (BINSTEINER 1990, 33 und 34 Abb. 20). Solche Stücke fehlen in der hier untersuchten Fläche.

Die DFG-Grabung untersuchte 2001 eine künstlich abgegrenzte Schicht, die, von oben kommend, am oberen Rand der Schachtmünder endet. Wenn die besonders schweren Stücke also regelhaft in tieferen Schichten lagen, erklärt dies ihr Fehlen im hier untersuchten Fundspektrum. Auch gab es im zweiten Planum keine Befunde, die durch ungestörte Altabensschotter voneinander getrennt wurden. Deshalb war es nicht möglich, die Artefakte jeweils einzelnen Befunden zuzuweisen, wie dies bei Binsteiner erfolgte.

^{2.14} Die Funde aus der Schicht zwischen Planum 0 und Planum 1 wurden nicht nach Schnitten getrennt (ebd.). Von der für sechs Schnitte angegebenen Gewichtssumme von 432,4 kg entfiel also ungefähr ein Sechstel (72,1 kg) auf den Schnitt 1.

Um auf der zur Verfügung stehenden Fläche die gleichen Bereiche der Schächte (trichterförmige Schachtmünder) zu erfassen, hätte bei der Projektgrabung eine Tiefe zwischen 80 cm und 150 cm untersucht werden müssen. Die Erklärung für die unterschiedliche Zusammensetzung der Hornsteinmengen aus der Altgrabung und der hier untersuchten Fläche lautet also folgendermaßen: in den beiden Grabungen wurden unterschiedliche Niveaus der Halde auf unterschiedliche Art erfasst (Bergung von Stücken > 5 mm). In der Altgrabung wurden vor allem größere taube und verworfene Stücke geborgen, in der Projektgrabung 2001 überwiegend kleinere Artefakte und Trümmerstücke (s. u. 3.2.2. Tab. 3.15). Diese Zusammensetzung wird sich auch bei den Fundgewichten bemerkbar machen (s. u. 3.2.1. Tab. 3.2): In der Bergwerksstichprobe befindet sich kaum taubes und negativ getestetes Rohmaterial, also Stücke die normalerweise eher ein größeres Gewicht besitzen. Das hier beprobte Schichtniveau lag in der Halde zu weit oben, um Bereiche mit solchen Stücken zu erfassen.

In gewisser Weise sind damit die alte und die neue Untersuchung also eine *Ergänzung* für einander. Rechnet man das bei der Altgrabung erfasste Volumen auf die hier untersuchte Fläche um (174,85 kg geteilt durch 50 mal 95,25), so ergeben sich für 95,25 m² Fläche Silexfunde im Gesamtgewicht von mindestens 336,59 kg. Die Fundgewichte der 1980er (336,59 kg) und von 2001 (369,72 kg) besitzen also ungefähr die gleiche Größenordnung. Das Gewicht pro Volumeneinheit wäre bei beiden in etwa gleich, wenn man für den Abhub der 1980er Jahre die gleiche Mächtigkeit annimmt. Dann ergibt sich ein Fundgewicht von ca. 14,1 kg / m³ in der Altgrabung und ca. ca. 17,2 kg / m³ in der aktuellen Fläche. Bei aller Unsicherheit, die mit diesen Vergleichen verbunden ist, zeichnet sich doch ab, dass die neuen Erkenntnisse zu Fundmenge und Zusammensetzung im Grundsatz den bisherigen entsprechen. Das mag banal klingen, hat aber eine wichtige Konsequenz: *Man kann die Ergebnisse von 2001 für das gesamte Bergwerk verallgemeinern.* Und das ist auch im Hinblick auf die Auswertung der Silexartefakte aus der Haldenschicht interessant (s. u. 3.2.1.ff.).

Danach lassen sich die *Fundmengen* folgendermaßen quantifizieren. In den oberflächennahen Haldenschichten liegt kein bzw. kaum taubes, unbearbeitetes Rohmaterial vor. Alle 121019 Sili-ces sind entweder getestete und verworfene Stücke oder Abschlüge und artifizielle Trümmer, sehr selten Klingen (zur Zusammensetzung ebd.). Damit sind alle Stücke als Artefakte anzusprechen, Manuporte (geförderte taube Stücke) traten in diesem Bereich der oberen Haldenschicht so gut wie nicht auf. Maximal enthielt eine Aushubeinheit aus ca. 50 Litern Sediment eine Anzahl von 3146 Stück im Gesamtgewicht von 6,817 kg, der fundärmste Aushub enthielt keinerlei Artefakte.

Die Annahme, es handele sich bei der Artefaktdichte aus der Haldengrabung um einen repräsentativen Wert, ergibt folgende Zahlen für die Funddichte im Zentrum des Bergwerks bzw. in Bereichen, die mindestens 40 m vom Rand entfernt sind. Für ein Ar Fläche ist mit einer Fundzahl von über 300 000 Silexartefakten zu rechnen, wenn die Halde in ihrer gesamten Mächtigkeit gesiebt worden wäre. Pro Hektar ergeben sich also ungefähr 30 Millionen Artefakte! Eine Anzahl von etwa 10 Millionen Artefakten pro Hektar ist als Minimalschätzung anzusehen.

Für die Auswertung wurden die *Funddichten* und das Durchschnittsgewicht pro Viertelquadratmeter interpoliert. Die Rasterkartenerstellung erfolgte mit dem Programm 'Surfer 8.0' von Golden Software. Den dabei entstandenen Rasterkarten wurde das Planum 2 als Linienplan hinterlegt. Da die Artefakte aus dem Sediment *über* den dokumentierten Befunden stammen, sind besonders Verteilungstendenzen zu beachten, die den Verlauf der Befunde betreffen: Schächte weiten sich zur Oberfläche hin in der Art eines Trompetentrichters. Artefaktkonzentrationen, die in den Kartierungen nur wenige Dezimeter neben dem Rand eines Befunds aus Planum 2 zu liegen kommen, lagen auf ihrem Niveau also tatsächlich schon teilweise *in* diesem Befund. Die räumliche Auflösung bei allen Aussagen zur Fundverteilung beträgt ca. 0,25 m, da die Funddichten nur jeweils mit der Mittelpunktskoordinate des Viertelquadratmeters räumlich lokalisiert werden konnten. Bei der Zuordnung von Befunden und Verteilungen sind daher Diskrepanzen von wenigen Dezimetern zwischen Befundgrenzen und Artefaktkonzentrationen kein Argument gegen mögliche Verbindungen.

Im *Planum 2* wurden alle Objekte erfasst, die sich irgendwie von einer ansonsten farblich monotonen graugelben Haldenschicht unterscheiden ließen. Diese Farblichkeit ist auf eine Bleichung durch die postneolithische Bodenbildung zurückzuführen (s. o. 1.5.). Manche Befunde zeichneten sich nur durch unterschiedliche Korngrößen vom Umgebenden ab, und manche nur durch ihr Abtrocknungsverhalten, d.h. sie waren jeweils nur kurz nach der Anlage des Planums zu sehen. Ihre Umrisse verloren sich nach dem Verdunsten der Bodenfeuchtigkeit wieder. Manche der im Planum 2 als Befunde erfassten Objekte sind vermutlich pedologische Phänomene. Sie entstanden durch die Lage *über* den Schächten, die hier nicht bis auf das Niveau des Planums reichten, sondern im Planum noch von der Halde späterer Aktivitäten überdeckt waren (vgl. o. 2.1.7.). Haldenschichten, die über anstehendem Altabensschotter liegen, besitzen ein anderes Entwässerungsverhalten als die Haldenpartien über den Schächten. Letztere weisen eine wesentlich geringere Lagerung auf (Durchdringbarkeit mit Rammsonde; GRÜNDER 2003, 69 und Anlage 4: DPL 4) – umgangssprachlich ausgedrückt: Sie sind "lockerer" gelagert.

Feinkornfraktionen, die in anderen Schichtbereichen das Wasser hielten, konnten dort mit dem versickernden Regenwasser nach unten in die Schächte gespült und farbgebende Mineralien dabei ausgewaschen werden. Daher stellen sich die Haldenschichten über Schachtmündern farblich anders dar. Neben dem CO₂ der Luft kommen verwitternde organische Bestandteile des Pflughorizontes und des Waldboden als Lieferant für die Huminsäuren zur Bleichung in Betracht.

Diese *pedologischen Phänomene* (Feinkornverlagerung und Bleichung) können auch Haldenschichten betreffen, die später einen Schacht überdeckten, mit diesem aber genetisch nicht in Verbindung stehen. Die Intensität des Prozesses der Minerallösung in den oberflächennahen Schichten wird vermutlich auch durch die unterschiedliche Versickerungsgeschwindigkeit der lösenden Phase (Regenwasser mit Luft-CO₂ und Huminsäuren) über bzw. neben den Schächten beeinflusst. Hier entstanden nachneolithische Veränderungen des Bodens, die das Erkennen und den genauen Verlauf von Befundgrenzen erschweren, da die Grenzen bodenchemischer Prozesse wesentlich diffuser ausfallen, als die zwischen Anstehendem und archäologischen Befund. Manche der nach archäologischer Autopsie gezogenen Befundgrenzen könnten solche Phänomene darstellen und damit die eigentlichen Befunde nur schemenhaft wiedergeben.

Ein anderer Effekt, der dazu führen kann, dass sich Schächte quasi durch Haldenschichten nach oben sozusagen durchpausen, ist ebenfalls mit der Schachtverfüllung verbunden. Diese wurde beim Einfüllen wahrscheinlich nur durch ihr Eigengewicht verdichtet, denn eine intentionale neolithische Verdichtung ist hochgradig unwahrscheinlich. Vor allem, aber nicht nur im oberen Bereich, waren die Verfüllungen der neolithischen Befunde zunächst also sehr locker und setzten sich erst nach längerer Zeit (GRÜNDER 2003, 64 und 69). Geringfügige Setzungserscheinungen reichen jedoch aus, um in den überdeckenden Haldenschichten scheinbare Schichtgrenzen entlang der Setzungskanten entstehen zu lassen. Die Konturen eines Schachtes könnten sich durch das langsame Zusammensacken seiner Verfüllung nach oben in solche Plana "durchpausen"^{2.15}, in denen der Befund gar nicht "vorhanden" war, weil er dort später von anderen Schichten überdeckt wurde. Dieser Effekt *kann* also auch in Schichten, die gar nicht zur eigentlichen Schachtverfüllung gehörten und zu einem späteren Zeitpunkt über den ehemaligen Schachtmund abgelagert wurden, Pseudobefundgrenzen erzeugen.

^{2.15} Durch im Untergrund ablaufende Karstprozesse könnten Erschütterungen erzeugt werden sein, die das Absetzen teilweise ruckhaft verstärkten (vgl. GRÜNDER 2003, 54ff.). Durch solche Verlagerungen werden Grenzen zwischen sich setzendem Sediment – und der darüber abgelagerten Halde – und den seitwärts benachbarten Schichten noch deutlicher.

In jedem Fall entwickelt sich das Mikro-Abflussmilieu entlang solcher Setzungskanten andersartig als in den umgebenden Schichten. Und das beeinflusst wiederum die Kornsortierung und die Bleichung, was nochmals den Eindruck verstärken kann, es läge eine Befundgrenze vor.

Nach Umriss und Größe zu urteilen, dürfte es sich bei den *Befunden*, die auf den Plana in der Halde aufgenommen wurden, in der Mehrzahl um Schächte handeln. Aber diese müssen, selbst wenn sie direkt benachbart sind und aufeinanderbezogene Verfüllungsschichten besitzen, weder gleich alt sein, noch zur gleichen Abbauproduktivität gehören. Denn die scheinbaren Bezüge können ebenso den beschriebenen pedologischen Prozessen geschuldet oder schlicht Zufall sein. Welche Befunde postsedimentär und welche synsedimentär entstanden, konnte bei der Grabung nicht ermittelt werden^{2.16}.

Die oben erläuterten Prozesse führen aber nicht nur zur Bildung oder Verstärkung vermeintlicher Befundgrenzen, durch sie können auch größere, diffuse Phänomene entstehen. Wenn unter einem Bereich der Halde zwei oder mehr Schächte nahe beieinander liegen, überlagern sich die erwähnten Prozesse in den Schichten darüber gegenseitig. Die Ränder solcherart entstandener Phänomene sind nicht scharf und daher nur schlecht abgrenzbar. Sie verlaufen anders als bei "echten" Schächten: diffus und unregelmäßig. Auch aus diesen Gründen ist bei der Frage nach Art und Entstehung der Befunde bzw. evidenten Strukturen die Verteilung der Funde von eminenter Bedeutung.

Schließlich können sich die schon beschriebenen *Störungen* des Abbaumusters noch auswirken (s. o. 2.1.4.1.). Das Feld 1 liegt unmittelbar östlich der befundorientierten Haldengrabung. Die Schachtverteilung und damit auch die Fundverteilung in den Haldenschichten kann daher genauso wie die dortige Fläche von Schächten "gestört" worden sein, die nach der systematischen Flächennutzung in Lücken zwischen den bestehenden Altschächten niedergebracht wurden. Die Artefaktverteilung weist also vielleicht auch Bezüge zu späteren, unsystematischen Bergbauaktivitäten auf.

Vor diesem Hintergrund wurde die Funddichte rechnerisch mit der Interpolationsmethode *Kriging* ermittelt. Sie schätzt ausgehend von bekannten Messungen die Werte eines räumlichen Phänomens für die unbeprobten Flächen um und zwischen den Meßpunkten (NIPPER 1981). Da im vorliegenden Fall der durchschnittliche Messwert als bekannt angesehen werden kann, wurde die Variante 'Ordinary Kriging' eingesetzt. Auf diese Weise wurde das Aussehen zweier räumlicher Phänomene berechnet: die Funddichte und das durchschnittliche Artefaktgewicht.

^{2.16} Die Überlegungen zu den geo- bzw. pedologischen Prozessen in der Halde wurden erst nach der Grabung entwickelt. Zum Zeitpunkt der Planumsanlage bestanden daher keine Überlegungen, um das Problem anzugehen.

Die Methode Kriging wird an anderer Stelle noch ausführlicher diskutiert werden (s. u. 4.1.2.). Hier sei sie und ihre Anwendung nur kurz umrissen. Wenn man weiss, wie die Ähnlichkeit von Messwerten mit dem Abstand zwischen ihnen abnimmt, kann man mittels Kriging diese Erkenntnis zur Grundlage der statistischen Schätzung machen. Dadurch ist es möglich, die Interpolation des interessierenden Phänomens optimal an die Eigenschaften seiner räumlichen Verteilung anzupassen. In der Praxis geschieht dies durch die Anpassung der mathematischen Formeln und Parameter.

Hier wurden folgende mathematischen *Modelle und Parameter* verwendet. Bei der Schätzung der Artefaktdichte kam ein idealisiertes Semivariogramm vom Typ 'spherical' unter der Annahme von Isotropie zum Einsatz (s. u. Anhang 6.1.1.1.1.). Für den Parameter Schwellenwert ('sill') wurde die Größe 161500 und für die Reichweite ('range') der Wert 2,28 m gewählt. Möglichen Messwertungenauigkeiten wurde mit einem Nugget-Effekt von 10 000 begegnet.

Der Anteil verbrannter Artefakte in einem Teil der Untersuchungsfläche wurde ebenfalls mit einem idealisierten Semivariogramm vom Typ 'linear' unter der Annahme von Isotropie geschätzt (s. u. Anhang 6.1.1.1.3.). Der Schwellenwert ('sill') wurde auf 127 und die Reichweite ('range') auf 1,75 m gesetzt.

Zusätzlich kann man bei der verwendeten Software (Surfer 8.0) noch festlegen, welche Messwerte überhaupt einbezogen werden. Bei der Artefaktdichte lautete die Regel: Ausgehend vom jeweils zu interpolierenden Punkt wurde die Umgebung in vier Sektoren geteilt; davon durften maximal drei leer sein; pro Sektor wurden maximal die 20 nächsten Datenpunkte herangezogen; das Minimum an notwendigen Datenpunkten war zehn. Bei der Schätzung des Anteils verbrannter Stücke wurden wegen der kleinen Zahl von Datenpunkten alle vorhandenen Messungen einbezogen.

Das Durchschnittsgewicht wurde mit der Methode 'minimum curvature' interpoliert. Hier legte das Semivariogramm nahe (s. u. Anhang 6.1.1.1.2.), dass die Messwerte zu weit auseinander lagen, um für das Kriging eine gut begründbare Schätzfunktion ermitteln zu können. 'Minimum curvature' wird im Abschnitt 4.1.2. in aller Ausführlichkeit vorgestellt. An der Methode interessierten Lesern wird an dieser Stelle der Vorgriff auf diesen Textteil empfohlen. Hier werden nur die Parameter für diese Methode durchgegeben. Die 'Internal Tension' wurde auf der Grundeinstellung ("0") belassen, ebenso der 'Relaxation Factor' ("1"). Als 'Maximum Residual' wurde ein Wert von 0,051 gewählt. Die 'Maximum Iteration' schließlich betrug 100 000.

Die *Ergebnisse der Interpolationen* beschreiben die Verteilungen alle in einer bestimmten Form. Die zugrunde gelegten Daten wurden für Viertelquadratmeter erhoben. Die interpolierten Werte repräsentieren deshalb auch je einen 0,5 m mal 0,5 m großen Ausschnitt.

Ein Schätzwert an einer Koordinate ist folgendermaßen zu verstehen: Hätte man um diesen Punkt herum einen Viertelquadratmeter abgesteckt und dort das zu schätzende Phänomen genau untersucht, wäre dabei der geschätzte Wert zustande gekommen. Diese Art der Darstellung eines eigentlich für eine ganze Untersuchungseinheit (Viertelquadratmeter) erhobenen Wertes wird in der Geographie als Isoplethen-Karte bezeichnet (CONOLLY/LAKE 2006, 273f.)

Die *Umsetzung* einer mathematischen Schätzfunktion erfolgt stets auf die gleiche Weise (detailliert dazu 4.1.2.). Es wird ein Gitternetz aus Rastereinheiten über die im Halbmeterabstand verteilten Messungen der Artefaktdichte gelegt und für jeden Rasterpixel wird vom mathematischen Schätzverfahren ein Wert berechnet. Das Rasternetz für die Artefaktdichte und das Durchschnittsgewicht besteht jeweils aus 51 waagrechten und 51 senkrechten Linien von Rastereinheiten im Abstand von 0,2 m. Eine solche Gitternetzgeometrie führt zu einer “weicheren“ Interpolationsoberfläche als das ursprüngliche 0,5 m Raster und erlaubt gleichzeitig eine bessere Lokalisierung möglicher Trends. Die Ränder für beide Interpolationen wurden auf die Koordinatenlinien Y min. = 45 (Südrand) und Y max. = 55 (Nordrand) bzw. X max. = -34 (Ostrand) und X min. = -44 (Westrand) gelegt. Sie entsprechen damit weitgehend der realen Grabungsgrenze. Die Abweichungen zwischen Grabungsgrenze und Gitternetzrand bewegen sich im einstelligen Zentimeterbereich.

Die Anteile verbrannter Artefakte wurden nur in einem Ausschnitt von Feld 1 untersucht. Die Gittergeometrie dieser Interpolationsoberfläche besteht aus 36 senkrechten und 26 waagrechten Linien aus Rastereinheiten im Abstand von 0,1 m. Als Grenzen wurden die Koordinatenlinien Y min. = 49,5 (Südrand) und Y max. = 52 (Nordrand) sowie X max. = -38,5 (Ostrand) und X min. = -42 (Westrand) gewählt. Die Grenzen entsprechen dem Kasten, der in Abbildung 2.48 diese Interpolation begrenzt.

Die berechneten Zahlenwerte werden unterschiedlich mit linienförmigen oder flächig gefüllten Isolinien dargestellt. Darstellungsweise und Kategoriegrenzen der Isolinien sind so gewählt, dass sie die jeweiligen Trends am besten abbilden.

Vorab sind einige Beobachtungen und Überlegungen zur möglichen *Genese der Halde* vorzustellen, um Anhaltspunkte für die Interpretation der räumlichen Verteilungen zu erhalten.

Die Verteilung der zahlreich anfallenden Artefakte bildete in der Halde menschliche Aktivitäten als latente Strukturen ab, ähnlich der Situation auf Jäger-Sammler-Rastplätzen. Die Artefakte kamen durch Arbeiten (Schachtbau, Rohmaterialtests und Abraumversatz) an ihre Position, die einen räumlichen Bezug zur Lage der Schächte aufweisen.

Beziehungen zwischen Funden und Schächten sowie zwischen Schächten untereinander sollten sich demnach auf irgendeine Weise in den Strukturen der Artefaktverteilung widerspiegeln.

Bei der Genese von Artefaktkonzentrationen ist zu bedenken, dass sich nicht alle Silexartefakte gleich "verhalten" (vgl. BRADTMÖLLER 2006, 33 und Taf. 20). Bei ihrer Entstehung streuen die kleinen, leichten Abschläge (Absplisse) tendenziell anders als größere Stücke. Letztere fliegen beim Abschlagen weiter, die anderen sammeln sich eher direkt unter dem Steinschläger. Die Absplisse "mischen" sich aufgrund ihrer Größe auch leichter ins Sediment, z. B. durch Eintreten. Kleinere Artefakte weisen somit eher auf die Nähe des ehemaligen Schlagplatzes und damit den Ort ihrer Entstehung hin. Sediment mit einem hohen Anteil dieser Stücke gehörte ursprünglich zu einem Schlagplatz. Ob, und wenn ja, wohin das Sediment verlagert wurde, kann aus Beziehungen zwischen Artefaktanzahl, Durchschnittsgewicht und Lage der jeweiligen Konzentrationen zu den Schächten gefolgert werden. Kombinierte Kartierungen dieser Phänomene bilden die Interpretationsgrundlage für diesen Auswertungsschritt.

Obertägige Halden entstanden, wenn nach dem Ausheben eines Schachtes der taube Versatz nicht mehr in einen leerstehenden Schacht verfüllt wurde, sondern in Form kleiner Hügel aus vermischten Sanden und Kiesen Übertage verblieb. Nach Erfahrungen des Kiesgrubenbetreibers entdichtet sich geförderter Kies auf etwa acht Siebtel seines ursprünglichen Volumens. Selbst wenn also später die Schächte wieder verfüllt wurden, entstand obertägig eine Landschaft mit kleinen Kuppen (Haldenhaufen) und Senken (Schachtmünder).

Aufgrund des Volumenzuwachses wäre zu erwarten gewesen, dass Reste der ursprünglichen neolithischen Oberfläche – also einer früh- bis mittelholozänen Parabraunerde (vgl. VÖLKEL/LEOPOLD 2001) – abgedeckt und so erhalten worden wären. Dies konnte aber nirgends im Bereich der ausgegrabenen Bergwerksflächen beobachtet werden. Demnach kann zumindest im gesamten Inneren der Bergwerksfläche von einem flächendeckenden Umgraben durch den neolithischen Bergbau ausgegangen werden. Wenn dieser Befund für das gesamte Bergwerk repräsentativ ist, stellt Arnhofen sowohl nach dem Volumen des umgelagerten Materials wie nach der Fläche einen der größten und intensivsten prähistorischen Erdeingriffe im südlichen Mitteleuropa dar.

Die neolithische Aktivität betraf auch unmittelbar die Reste vorhergehender Abbauphasen. Wurden unmittelbar neben den obertägig entstandenen Haufen neue Schächte angelegt oder wurde ein Haldenhaufen umgelagert, weil direkt unter ihm ein neuer Schacht angelegt werden sollte, dann konnten bei diesen Aktivitäten Artefakte in das Sediment untergemischt werden. Damit *Artefakte* auf der Oberfläche eines Abraumhügels zu liegen kamen, musste ein Schlagplatz nicht direkt dort gelegen haben.

Es war ausreichend, wenn die Schlagaktivitäten ein bis zwei Meter daneben stattfanden. Die dabei anfallenden Stücke streuten auch bis zum Abraumhügel^{2.17}.

Aber nicht nur wenn unmittelbar unter einem alten Abraumhaufen ein neuer Schacht angelegt werden sollte, wurden Artefakte verlagert, die sich darauf oder auf der Oberfläche in der Umgebung eines Schachtmundes befanden. Nach der Nutzung eines Schachtes musste dieser sofort wieder verfüllt werden, wenn in seiner unmittelbaren Nachbarschaft gefahrlos ein weiterer angelegt werden sollte. Dies war unabdingbar, um die Standfestigkeit des Untergrundes in der Nähe des neuen Schachtes nicht unnötig zu verringern (vgl. o. 2.1.5.). Ein offenstehender Schacht hätte jederzeit zusammenstürzen, und dabei Nachbarbereiche mitreißen können. Jemand der sich in der Nähe eines offenen Schachtmundes aufgehalten hätte, wäre hochgradig gefährdet gewesen. Deshalb bot es sich an, statt auf den Aushub aus dem neuen Schacht zu warten, den bereits an der Oberfläche angehäuften alten Versatz zu benutzen. Die Anlage des neuen vor der Sicherung des alten zu beginnen, hätte ja das Risiko eines Unfalls erhöht. Die alten Abraumhügelchen mussten nur in den aufgelassenen Schacht "geschoben" werden. Dabei wären sowohl die Artefakte aus der Fläche zwischen dem Hügelchen und dem Schachtmund als auch die auf dem Abraum befindlichen Stücke verlagert worden. Artefakte gerieten so nicht nur nahe der Haldenoberfläche in die Schachtmünder, sondern auch in die Schachtverfüllungen in größeren Tiefen. Da die Ausgrabungen des Projektes überwiegend auf die Erstellung von Plana und die Erfassung von flächenhaften Phänomenen (Artefakt- und Rohmaterialverteilung) ausgerichtet waren, sei hier auf die Erkenntnisse der Ausgrabungen von Engelhardt und Binsteiner zurückgegriffen (BINSTEINER 1990, 32ff.). Die Funde der oberflächennahen Grabung dort stammen überwiegend aus den trichterförmigen Schachtmündern. Sie weisen alle ungefähr die gleiche Zusammensetzung wie die Gesamthalde auf und bestehen aus einem Drittel tauben Materials und zwei Drittel "Absplisse" sowie Fragmente aller Art (BINSTEINER 1990, 34 Abb. 20).

Die Ähnlichkeit zwischen den Befundverfüllungen und der Gesamthalde belegte, dass die oberflächlich erzeugten Artefakte von der Umlagerung der Haldenhaufen betroffen waren und bei der Verfüllung der Schächte umgelagert wurden. In der Altgrabung nahm die Artefaktanzahl in den Befunden aber bereits in den unteren Schichten (bis 1,4 m) mit zunehmender Tiefe schnell wieder ab (BINSTEINER 1990, 33). Die Bereiche der Halde, auf denen die Steinschläger gesessen hatten, als sie das Rohmaterial testeten und taube Partien entfernten, wurden also zuletzt in die Schächte umgelagert.

^{2.17} Nach eigener Erfahrung streuen bei einem sitzenden Steinschläger Abschläge über 2 cm Länge bei direktem hartem oder weichem Schlag je nach Haltung des Kernes ca. 3 m in Richtung des Schlages und ca. 1 m bis 2 m in andere Richtungen.

Dies legt noch einmal nahe, dass die Artefaktkonzentrationen jeweils einen Bezug zu einem benachbarten Schacht besaßen.

Vergleichbare Beobachtungen konnte man im annähernd zeitgleichen neolithischen Bergwerk im französischen Jablines machen (vgl. o. 2.1.8.). Dort waren die Schachtwände in standfesten Kreidekalk gehauen und deshalb ließen sich ganze Schachtverfüllungen nach natürlichen Schichten ausgraben (BOSTYN/LANCHON 1992, 138ff.). Dabei war zu erkennen (a. a. O., 139 Fig. 128b), dass es jeweils eine Schicht in der Verfüllung gab, auf die der Löwenanteil der pro Schacht geborgenen Artefakte entfiel. In dieser Schicht waren im Durchschnitt 70,6 % der Stücke enthalten (Kennwerte berechnet nach a. a. O., 139 Fig. 128a; Kennwerte ohne Nrn. 573, 574 und 944). Sie war normalerweise diejenige, die als letzte von oben eingefüllt worden war. Die Prozentwerte für diese artefaktreichen Schichten variieren bei 30 so erfassten Schächten kaum: Die Artefaktanreicherung in der letzten Verfüllungsschicht war also die Regel. Die neolithischen Bergleute füllten demnach die Reste der Rohmaterialtests, der Kernvorpräparation und das taube Rohmaterial immer zuletzt in die Schächte. Für andere Befunde zeigten die Verteilungen der zusammensetzbaren Artefakte (a. a. O., 147, Fig. 137 und 138), dass die Artefakte einer Verfüllungsschicht normalerweise von einer einzigen verlagerten Artefaktkonzentration stammten.

In der Halde von Arnhofen erfolgte die *Verlagerung von Artefaktkonzentrationen* (Schlagplätze) bei der Bewegung von Haldenmaterial. Das geschah etwa beim Verkippen in einen Schacht. Dabei verblieben vor allem die kleineren leichteren Stücke quasi in der Art einer "Schleifspur" unter und neben den verschobenen Erdmassen teilweise im Untergrund nahe der Haldenoberfläche, während die größeren Stücke umgelagert werden. Im Idealfall sollten bei so einem Vorgehen Konzentrationen mit elliptischen bzw. leicht fächerförmigen Umrissen entstehen, die jeweils auf einen Schacht orientiert sind und im Gegensatz zu unverlagerten Konzentrationen keine größere Variation im Durchschnittsgewicht aufweisen.

Der Effekt all dieser Prozesse auf die Artefaktdichte ist abhängig von dem Niveau, auf dem das künstliche archäologische Stratum die jeweiligen Befunde erfasste. Wenn mit der Untersuchung die alte Oberfläche so verfehlt wurde, dass das analysierte Volumen dem Schachtmund entsprach, dann liegt die Artefaktkonzentration im Schachtmund. Der "Fächerumriss" der Konzentration weist dann nach außen vom Schacht weg. Wenn dagegen Niveaus erfasst wurden, die nahe der alten Oberfläche lagen, dann liegt die Konzentration deutlich neben dem Schacht, während der Fächer zum Schacht hinweist.

Vorstellbar ist aber noch eine weitere *neolithische Erdbewegung* an bzw. nahe der Oberfläche. In der befundorientierten Haldengrabung wurden flache, wannenförmige Befunde identifiziert, die manchmal (zumindest scheinbar) mehrere Schächte verbinden. Dabei kann es sich um obertägige Verbindungen zwischen Schächten gehandelt haben, wie sie von Engelhardt und Binsteiner beobachtet wurden (dies. 1988, 18). Es ist aber auch denkbar, dass irgendwann längere Zeit nach der Beendigung einer ersten Abbauaktivität an demselben Platz erneut unter der Halde bis auf das Anstehende gegraben wurde, um im bereits abgebauten Gebiet zwischen den alten Schächten neue anzulegen. Die unberührten Flächen zwischen den alten Schächten waren nach einer gewissen Zeit von der Oberfläche aus wesentlich schlechter erkennbar, als im ungestörten Anstehenden. Um dieses flächig aufzudecken hätte man flache wannenförmige Gruben ausheben müssen. Dabei könnte die Unterscheidung zwischen Schächten, die von der Wanne geschnitten wurden, und solchen, die von ihr ausgingen, durch die oben beschriebenen, postneolithisch-pedologischen Prozesse bis zur Unkenntlichkeit erschwert worden sein. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse zur Schachtverteilung bei der befundorientierten Haldengrabung sind solche oder ähnliche Eingriffe hier sogar zu erwarten.

Im Gegensatz zu den Archäologen, für die die Identifizierung alter Schächte eine wissenschaftliche Herausforderung darstellt, war für die Neolithiker die genaue Lokalisierung der Vorgängerschächte eine Sache von Leben und Tod. Um hier sicher zu gehen, mussten sie bei Zweifeln die Haldenschichten bis auf ein Niveau aufgraben, das es erlaubte die Schächte eindeutig zu identifizieren.

Solche neolithischen Erdbewegungen könnten auch als "Suchschnitte" bezeichnet, denn wie Archäologen suchten auch die Neolithiker die Schächte, wenn auch aus einem völlig anderen Grund. Für diese "Suchschnitte" mussten Vertiefungen mit flachem Boden ausgehoben werden, was die Verlagerung zahlreicher Artefakte zur Folge hatte. Die neolithischen "Suchschnitte" dürften vor allem die Bereiche mit aufgehäuften Versatz betroffen haben, da unter diesen noch unberührter Untergrund zu vermuten war. Die Mulden dagegen, die durch Setzungserscheinungen der alten, verfüllten Schächte entstanden waren, bildeten für sie einen Negativbefund. Beispielsweise könnte der langgezogene Befund im südwestlichen Viertel der Grabungsfläche das Ergebnis einer solchen Suchschnitt-Aktivität sein (s. u. orange Ellipse in Abb. 2.43). Dieser Befund ist aber vielleicht auch nur das Ergebnis mehrerer bleichender und das Sediment umgestaltender Prozesse, die sich an ihren Rändern überlagerten und so zu einem nur scheinbar großflächigen Befund "zusammenwachsen".

Die Motivation, im Bergwerksinneren auf vermeintlich weitgehend ausgebeuteten Flächen nochmals "Suchschnitte" und Schächte anzulegen, dürfte vor allem einen Grund gehabt haben: Hier lagen die Flöze näher an der Oberfläche^{2.18}. Das Niveau der Flöze verringerte die nötige Schachttiefe und damit auch das mit jedem Meter Teufe wachsende Risiko. Vor allem aber ist bei geringerer Teufe der Arbeitsaufwand wesentlich geringer, denn die eigentlich kraftzehrende Arbeit bestand nicht im Lockern des Sediments, sondern in der mühsamen Seilförderung des Versatzes. Und diese wurde umso mühseliger, je tiefer ein Schacht gegraben wurde.

Für die Artefakte bestanden jedenfalls mehrere Möglichkeiten der *Untermischung* in eine Haldenschicht. Dabei beeinflussten vor allem zwei Faktoren die Artefaktdichte in der Halde. Der eine war die Lage von Schlagplätzen, bei deren Betrieb die Artefakte anfielen, der andere die Häufigkeit neolithischer Erdbewegungen nach der Entstehung der Schlagplätze. Besonders hohe Artefaktdichten sind ursprünglich nur in der Nähe ehemaliger Schlagplätze denkbar. Allerdings ist kaum anzunehmen, dass Konzentrationen, die heute mehrere Dezimeter unter der Oberfläche in der Halde anzutreffen sind, die unverlagerten Reste von Schlagplätzen darstellen. Schlagplätze, die zu den jüngsten Schächten gehörten, lagen oben auf der neolithischen Oberfläche. Diese ist aber spätestens bei der Beackerung, die den subrezentem Pflughorizont erzeugte, gekappt, umgelagert und nivelliert worden. Die einstmals oben auf ihr abgelagerten Artefakte wurden dadurch verlagert und in den Pflughorizont gemischt, der hier nicht ausgewertet wird.

Alle Konzentrationen in den Haldenschichten unterhalb des Pflughorizontes müssen zudem nach obigen Überlegungen als Ergebnis von neolithischen Verlagerungen gelten, die in Zusammenhang mit der Anlage benachbarter Schächte entstanden. Es ist hochgradig unwahrscheinlich, dass ein Schlagplatz beim Ausheben eines neuen Schachtes mit Versatz zugedeckt wurde und eine Art "Pompeji-Situation" entstand. Nicht zuletzt, da ja die Bergleute selbst die Hinterlassenschaften der Hornsteinbearbeitung in die Schächte füllten (s. o.). Auch wenn einmal ein Versatzhügel einen Schlagplatz zunächst abdeckte, waren doch gerade die Erhebungen in der Halde von allen beschriebenen bzw. vermuteten Prozessen am stärksten betroffen, und mit ihnen die darauf bzw. darunter liegenden Konzentrationen.

Verallgemeinert ausgedrückt ist also die Artefaktdichte in den untersuchten Haldenschichten eine *Funktion der Intensität neolithischer Erdbewegungen* der Halde.

^{2.18} Der Tendenz nach liegen die Flöze umso näher an der Oberfläche, je weiter man nach Norden kommt. Im Bereich der Haldengrabung befinden sie sich schätzungsweise 4 m unter der Oberfläche. Pro 10 m in Richtung Süd-Süd-Ost sinken sie um etwa 1 m ab. Dies ist allerdings nur eine sehr grobe Beschreibung des Trends.

Wo die Dichte extrem hohe Werte erreicht, ist von verlagerten Schlagplätzen auszugehen, wobei jeweils mehrere verschiedene Prozesse für ihre Verlagerung in Frage kommen. Mittelhohe Artefaktdichten außerhalb der Konzentrationen markieren aller Wahrscheinlichkeit nach Haldenschichten, die häufig verlagert wurden. In Bereichen mittlerer bis geringer Artefaktdichte kann die Dichte als Maß der Intensität der Erdbewegungen angesehen werden. Für Haldenschichten, die wenig oder gar nicht umgelagert wurden, gab es indes kaum eine Gelegenheit zur Untermischung von Artefakten. Niedrige bzw. sehr niedrige Artefaktdichten sind somit ein Anzeichen für nur einmal oder nur wenige Male bewegte Haldenbereiche.

Innerhalb einer *Gruppe* aus mehreren nacheinander angelegten Schächten sind die Bereiche zwischen den zusammengehörigen Schächten am stärksten durch Aktivitäten wie Verlagerungen, Verfüllungen und Sedimenttransport von einem Schacht in den anderen betroffen. Das betraf alle Bereiche entlang der Längsachse einer Schachtgruppe, weil hier mehrere Male Versatz umgelagert und so mit Artefakten angereichert wurde. Bei jeder Verlagerung, die das Haldenmaterial mitmachte, stieg die Wahrscheinlichkeit für die Anreicherung des Sediments mit Artefakten.

Die Haldenschichten am Rand einer Gruppe erfuhren dagegen kaum Umlagerungen, da die Erdarbeiten vor allem direkt um und zwischen den zusammengehörenden Schichten erfolgten.

Bei der Anlage von mehreren Schächten hintereinander während einer Bergbauaktivität sollten also Flächen am Rande der Gruppe die geringsten Dichten aufweisen, da hier die Eingriffe in den Untergrund am schwächsten waren. An den Grenzen zwischen Schachtgruppen entstanden danach größere, langgezogene Bereiche mit Artefaktdichten, die im Vergleich zur jeweiligen Umgebung besonders niedrig ausfallen. Das heißt nicht, dass die Dichte einen geringen Wert annehmen muss! Sie muss nur im Verhältnis zu ihrer Umgebung geringer sein.

Gesucht sind also lineare Trends geringster relativer Dichte. Wenn sie auf eine Schachtgruppe zurückgehen, sollten sie gleichzeitig mehrere einzelne Konzentrationen umfassen. Trifft man auf solche Strukturen, hat man anhand der Fundverteilung die Grenze zwischen zwei Schachtgruppen gefunden.

Da sich wie erläutert leichte Artefakte anders verhalten als schwerere Stücke, wird zunächst ermittelt, welchen Anteil erstere an den Funden aus einem Viertelquadratmeter bilden (**Abb. 2.43**). Die Funde konnten wegen der großen Anzahl nicht einzeln, sondern nur nach Viertelquadratmetern zusammen gewogen werden. Der Artefaktdichte wird hier das Durchschnittsgewicht pro Viertelquadratmeter gegenübergestellt.

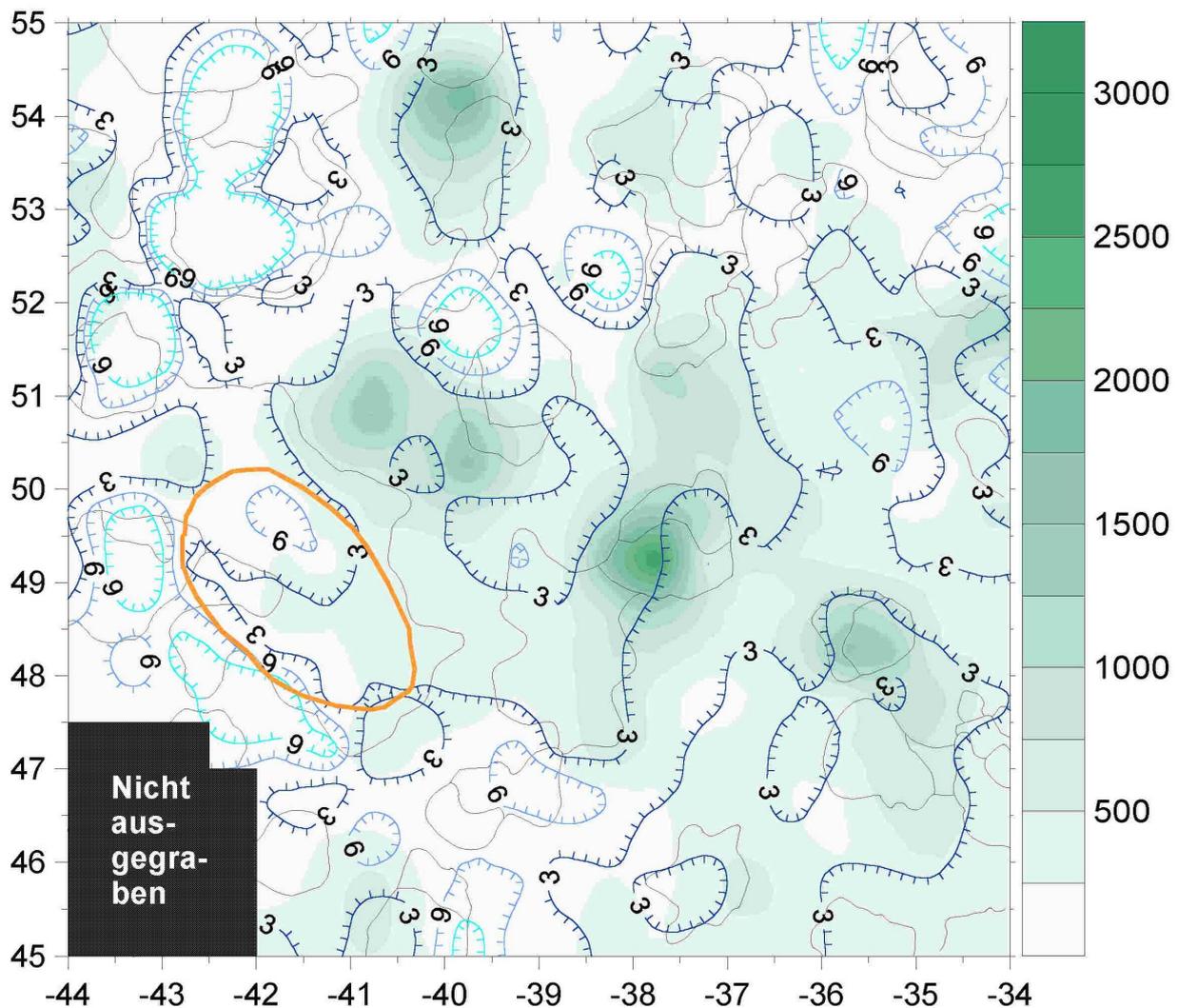


Abb. 2.43: Abensberg-Arnhofen. Überlagerung der Interpolationen von Artefaktdichte und Durchschnittsgewicht in der fundorientierten Haldengrabung (Feld 1).

Die Dichte der Artefakte pro Viertelquadratmeter ist in grünen flächigen Isohypsen (Legende) und das Durchschnittsgewicht pro Viertelquadratmeter in blauen Isolinien (3 g Klassen, Schraffur innen) abgetragen. Die Befunde des Planums 2 sind als dunkelgraue Linien unterlegt. Der orange Linienzug umschreibt einen möglichen "Suchschnitt" (vgl. Text). Das Plan-Nord ist um 5,3° Grad gegen den Uhrzeigersinn von der geographischen Nordrichtung verschoben. Diese Orientierung betrifft alle abgebildeten Pläne in diesem Kapitel.

Der *Gewichtsdurchschnitt* aller 121019 Stücke bildet mit seinen 3,1 g einen Orientierungswert dafür, ab wann es sich um leichtere Stücke handelt. Hier werden alle Viertelquadratmeter mit einem Artefaktdurchschnittsgewicht unter 3 g als Bereiche angesehen, die von leichten Stücken dominiert werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Konzentrationen mit extrem hohen Artefaktdichten in diese Kategorie fallen. Dies ist allerdings bis zu einem gewissen Punkt zu erwarten. Bei Arbeiten mit Silex fallen normalerweise extrem viele Absplisse an. Konzentrationen bestehen also vor allem aus kleinen Stücken mit geringem Gewicht.

Diese werden unter normalen Grabungsbedingungen, etwa in Siedlungsbefunden auf tonhaltigem Mineralboden, wegen des Arbeitsaufwandes nicht geborgen. Hier allerdings war es möglich, Stücke bis zu einer Größe von 5 mm zu bergen, weil sie in fast reinen Sanden und Kiesen eingelagert waren und einfach ausgesiebt werden konnten. Die Konzentrationen bestehen deshalb aus einer großen Zahl sehr kleiner Stücke. Daher verringern sich automatisch die Gewichts-durchschnitte. Das absolute Verhältnis von Dichte zu Durchschnittsgewicht ist somit teilweise Ergebnis der Bergungsmethode. Da aber alle Funde unter den gleichen Bedingungen geborgen wurden, sind die unter dem Mittelwert liegenden Gewichtsdurchschnitte bei den Konzentrationen kein künstliches Ergebnis der Methode sondern ein interpretierbarer Befund. Mit anderen Worten, sowohl die Unterschiede bei den Dichten wie den Durchschnittsgewichten sind echte Resultate.

Von den *Artefaktkonzentrationen*, die mehr als 500 Stück pro Viertelquadratmeter aufweisen, fallen interessanterweise alle bis auf eine (-38,25 O, 53,75 N) in Bereiche, die von leichteren Stücken dominiert werden. Damit sind Prozesse auszuschließen, die eine Einmischung schwererer Stücke zur Folge haben: Auch bei Verlagerungen sind die Reste von Schlagplätzen an der Dominanz leichter Stücke (Absplisse) erkennbar. Die Annahme, wonach Artefaktkonzentrationen als Ergebnis der Verlagerung von Schlagplätzen auftreten, ist somit zu bestätigen. Ein Zustandekommen durch zufälliges "Zusammenschaufeln" von Artefakten kann abgelehnt werden, denn dann sollten ja auch schwerere Stücke untergemischt worden sein.

Außerdem sind Bereiche zu erkennen, die den Konzentrationen benachbart sind und ebenfalls geringe Durchschnittsgewichte aufweisen. Ihre Zusammensetzung entspricht damit den Verhältnissen, die am Ort eines Schlagplatzes auftreten müssen, wenn die Artefakte von dort verlagert wurden. Diese Bereiche dürften entweder Startpunkt oder Endpunkt der Verlagerung einer Konzentration sein. Diese lang gestreckten Fundschleier stellen die oben hypothetisch postulierten "Schleifspuren" dar, die bei der Verlagerung einer Artefaktkonzentration auftreten sollten. Auf diesen Aspekt wird noch einmal zurückzukommen sein.

Eine Möglichkeit, die *Trends einer Funddichteverteilung* besser kenntlich zu machen, basiert auf folgender Überlegung. Die langgestreckten Flächen mit minimaler Artefaktdichte sollten mit einem rechnerischen Analyseschritt ermittelt werden, anstatt sie von Hand arbiträr einzuzeichnen. Die zunächst bloß zur Verbesserung der Visualisierung genutzte dreidimensionale Darstellung der interpolierten Artefaktdichte führte zu der Idee, die Artefaktdichte nicht nur so darzustellen (**Abb. 2.44**), als ob es sich um Höhenwerte handele, sondern sie mit der Software auch tatsächlich so zu behandeln.

Gesucht sind als vermutliche Grenzen von Schachtgruppen diejenigen Bereiche mit der *niedrigsten Artefaktdichte im Vergleich zum jeweils umliegenden* Sediment. Es wird also ein Vorgehen benötigt, das die *regionalen* Minima der Artefaktdichte in *linear verbundener* Weise mit einem objektiven Analyseschritt aufspürt und abbildet.

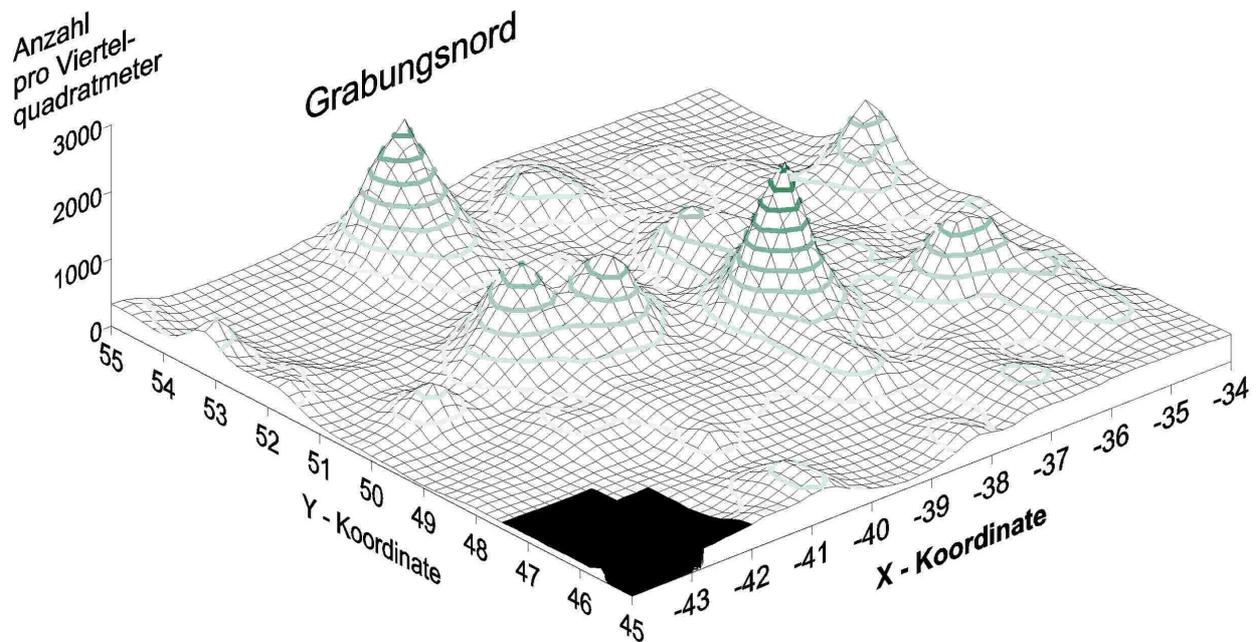


Abb. 2.44: Abensberg-Arnhofen. Blick von Südwest auf die dreidimensional dargestellte, interpolierte Artefaktdichte in der fundorientierten Haldengrabung.

Die Artefaktdichte ist zusätzlich in grünen linearen Isohypsen (Legende s. o. Abb. 2.43) über das Gitternetz gelegt. Der Z-Wert ist wie in Abb. 2.43 die Artefaktzahl pro Viertelquadratmeter. Der für einen Gitterknoten errechnete Dichtewert ist als Erhebung dargestellt. Je größer die Artefaktdichte pro Viertelquadratmeter ist, desto höher wird die Erhebung. Die "Berge" stellen also Artefaktkonzentrationen dar. Die "Täler" sind Flächen mit niedriger Artefaktdichte, denn, je geringer die Artefaktdichte an einer Koordinate ausfällt, desto "niedriger" liegt diese.

Betrachtet man die Artefaktdichte quasi als *Landschaftsoberfläche*, eröffnet sich die Möglichkeit einer mathematisch objektiven Lokalisierung der gesuchten linearen Trends der geringsten relativen Artefaktdichte. Bei einer Landschaft mit ausgeprägtem Höhenrelief sind die räumlich linear miteinander verbundenen Bereiche der geringsten Höhe ganz einfach die Täler! Sie bilden die potentiellen Wasserablauffinnen. Da die Hydrologie einer Landschaft in der Geographie von sehr großer Bedeutung ist, besitzen manche GIS-Softwareanwendungen zu ihrer Analyse spezielle Module. Die meisten erstellen zunächst eine Kartierung, mit der man die 'local drainage direction' abbildet, also das Drainageverhalten von Wasser in einem Geländeausschnitt (CONOLLY/LAKE 2006, 256ff.). Von dieser Grundlage können verschiedene Karten abgeleitet werden, z.B. eine 'flow-accumulation-map'.

Das ist eine Kartierung, auf der die vom Wasserabfluss betroffenen Flächen entsprechend der Abflussintensität ausgewiesen sind. Wo sich Senken befinden, würde potentiell Wasser zusammenfließen. Verbundene Senken bilden die Abflussrinnen bzw. die Täler. Täler sind nun nichts anderes, als die hydrologisch definierten linearen Trends der jeweiligen geringsten Geländehöhe. Diese Methode aus der Hydrologie erlaubt also über die Auffindung von Tälern die Identifizierung linearer Trends.

Bei der Software "Surfer 8.0." kann man einen ähnlichen Schritt mit dem Modul 'Terrain-Modeling: Plan-Curvature' durchführen. Die *Plankurvatur* beschreibt den Verlauf eines Geländes, indem sie eingewölbte oder aufgewölbte Formen in einer Rasterkarte ausweist (CONOLLY/LAKE 2006, 196f.). Deren Werte repräsentieren den Grad der Geländewölbung. Das Software-Modul erzeugt auf der Basis eines Oberflächenmodells eine Rasterkarte, bei der dort positive Werte auftreten, wo Wasser zusammenfließt (GOLDEN SOFTWARE 2002, 431). Bereiche mit dem gleichem Wasserabflussverhalten sind also gleichfarbig dargestellt – die Täler besitzen in dieser Karte die Maximalwerte.

Mit der Analyse der Artefaktdichte kann man demnach *Grenzen zwischen Aktivitätszonen* aufspüren (**Abb. 2.45**). Behandelt man die Artefaktverteilung als Landschaftsoberfläche, bei der die Artefaktdichte dem Höhenwert entspricht, dann setzt man die Bereiche mit niedriger Dichte den Geländesenken gleich. Die vom Modul 'Terrain-Modeling: Plan-Curvature' jetzt ausgewiesenen Bereiche sind diesmal aber nicht die Täler in einer Landschaft, sondern es sind die linearen Trends der jeweils regional geringsten Artefaktdichte. Indem das mathematische Verfahren die Lage vermeintlicher Täler berechnet, erarbeitet es also tatsächlich die Lage der Phänomene, die potentiell Grenzen zwischen Schachtgruppen sein können. Die Artefaktverteilung rechen-technisch als Höhenrelief zu behandeln, erlaubt es also, die gesuchten Strukturen mathematisch zu lokalisieren.

Die graphische Darstellung der linearen Trends geringster Dichte zeigt zunächst ein netzartiges Muster linearer Strukturen, das sich grob einem Nord-Süd orientierten Trend unterordnet. Die Untersuchungsfläche wird durch diese Strukturen in mehrere Bereiche zerschnitten. Innerhalb ihrer Grenzen liegen jeweils mehrere Befunde. Andere Befunde werden von den Strukturen überdeckt. Hier ist daran zu erinnern, dass nicht alle im Planum dokumentierten Schächte *einer* Abbauphase angehören müssen und zudem eine räumliche Unschärfe von mehreren Dezimetern für alle Phänomene besteht, die mit der Artefaktdichte verbunden sind.

Das Ergebnis erinnert mit seinem Gitternetz auf verblüffende Weise an *Thiessenpolygone*, wenn man nur diejenigen linearen Strukturen beachtet, die mehr als 0,5 m Länge messen und nur durch kurze Unterbrechungen von benachbarten Strukturen gleicher Ausrichtung getrennt sind.

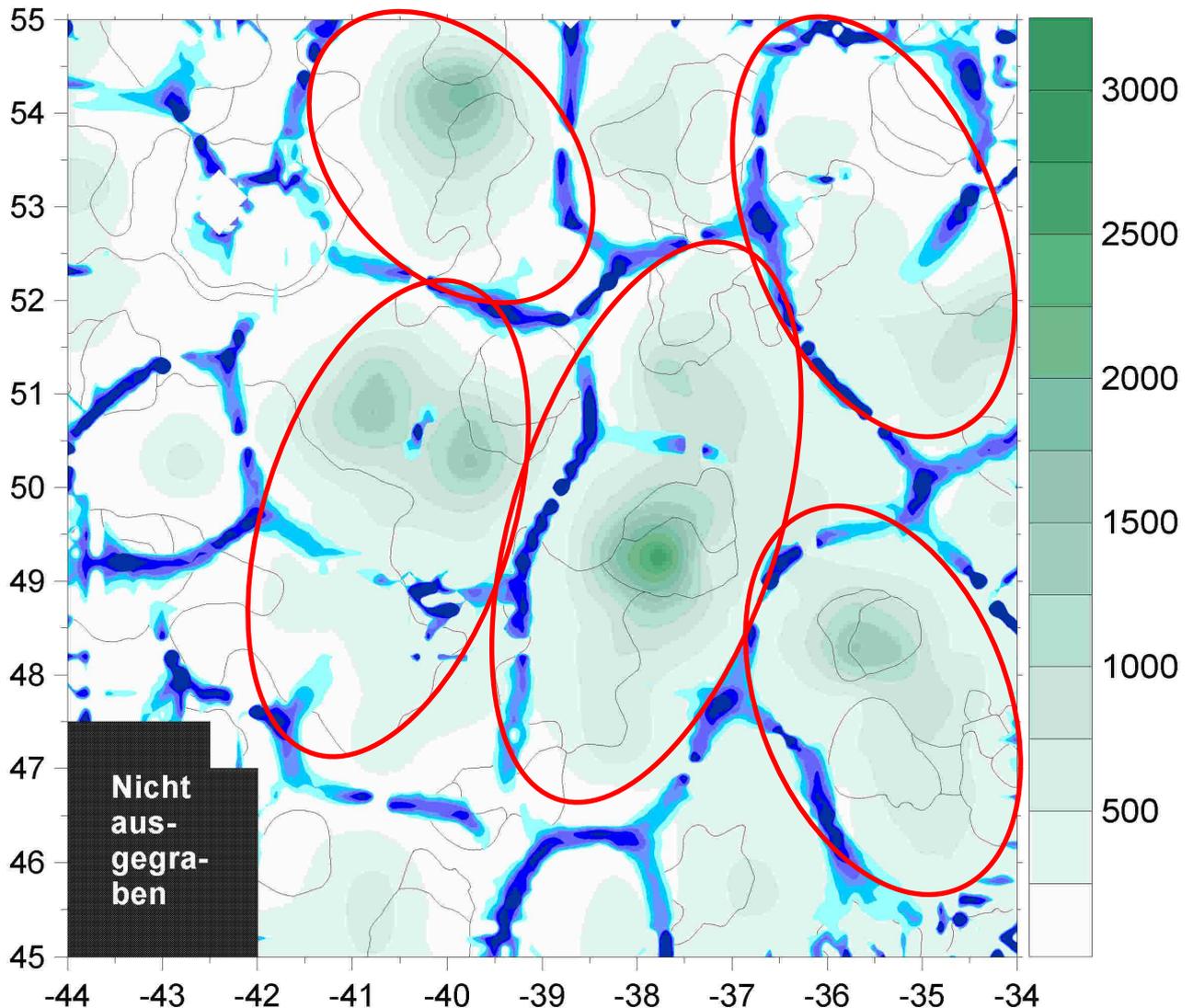


Abb. 2.45: Abensberg-Arnhofen. Interpolierte Artefaktdichte (grün) in der fundorientierten Haldengrabung überlagert mit den linearen Trends der geringsten Dichte (blaue Streifen). Größere zusammenhängende Flächen, die von den Trendlinien abgegrenzt werden, sind mit roten Ellipsen markiert (zur Artefaktdichte s. o. Abb. 2.43). Die Befunde des Planums 2 sind als dunkelgraue Linien unterlegt.

Dass dieses Gitternetz den Polygonen in den vorangegangenen Abschnitten so ähnlich sieht, ist kein Zufall! Da die linearen Trends der regional geringsten Dichte aller Wahrscheinlichkeit nach den Rand von Erdbewegungen und damit auch den Rand von Aktivitäten beim Schachtbau anzeigen, ist ihr Verlauf zugleich ein Indiz für den Flächenverbrauch bei diesen Aktivitäten.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde postuliert, dass die jeweils einem Schachtmittelpunkt am nächsten gelegene Fläche, also das Thiessenpolygon, zugleich den Flächenverbrauch eines Schachtes wiedergibt. Die Übereinstimmung zwischen den Trends in der Artefaktverteilung und den Thiessenpolygonen zeigt nun, dass von den Erdbewegungen in Zusammenhang mit der Anlage der Schächte jeweils nur das nächste Umfeld betroffen war.

Man kann insgesamt fünf größere *streifenartige Flächen* erkennen (**Abb. 2.45, rote Ellipsen**), die mit einer Länge von ca. 3,5 m bis 6,5 m und einer Breite von 2,5 m bis 3,5 m in etwa der Größe einer Schachtgruppe entsprechen (vgl. o. 2.1.6. und 2.1.7.). Die Längsachsen dieser Flächen sind bei zweien Südsüdwest-Nordnordost und bei den anderen drei Nordnordwest-Südsüdost bzw. Nordwest-Südost orientiert. Kritisch zu bemerken ist jedoch, dass genaue genommen nur eine Fläche, und zwar die größte in der Mitte, einen weitestgehend klaren Grenzverlauf aufweist und vollständig erfasst wurde. Drei andere werden von der Grabungsgrenze gekappt, sind also wegen mangelnder Kenntnis der Umrisse nicht interpretierbar.

Nimmt man an, dass alle linearen Strukturen der geringsten Artefaktdichte ungefähr den Verlauf von *Gruppengrenzen* wiedergeben, ist zweierlei zu bemerken. Erstens kommen zwischen zwei und vier Befunde, die als Schächte angesehen werden können, innerhalb der abgegrenzten Bereiche zu liegen. Damit entsprechen die Schachtzahlen denjenigen, die bei den Schachtgruppen auftreten. Zweitens passen die Ausrichtungen der so abgegrenzten Gruppen auffallend gut zur Ausrichtung der Schachtgruppen in den benachbarten Grabungsbereichen (vgl. u. Abb. 2.49).

Die westliche der beiden zentralen langgestreckten Flächen ist kein homogenes Areal, sondern wird von einem starken Ost-West ausgerichteten Trend halbiert, der mit dem oben als "Suchschnitt" bezeichneten Befund verbunden werden kann. Möglicherweise entstanden Artefaktverteilungen solcher Art, wenn bei späteren "Störschächten" erneut die Halde durchwühlt und die Artefakte verlagert wurden.

Von besonderer Bedeutung ist aber die lang gestreckte, zentrale Aktivitätsfläche. Ihre Grenzen liegen auf allen Seiten im untersuchten Areal, weshalb sie als die einzige vollständig erfasste Struktur dieser Art anzusehen ist. Ihre Ausrichtung entspricht genau der, die aufgrund der Schachtgruppenorientierung in den anderen beiden Untersuchungsflächen ("Kiesgrube" und "Halde") zu erwarten gewesen wäre.

Bei der Untersuchung von Verteilungen kann man auch die räumliche *Verbreitung von Artefaktmerkmalen* in den Mittelpunkt stellen. Nach dem ersten Schritt, der normalerweise die Analyse der Gesamtheit einer Fundansammlung (Anzahl und Gesamtgewicht) umfasst, lassen sich die Verteilung weiterer Merkmale in dieser Gesamtheit untersuchen.

Die Resultate dieser Auswertungsschritte erlauben eine zusätzliche Verfeinerung der Erkenntnisse zu Art und Ursache der Fundverteilung.

Bei Silexartefakten bietet sich neben Merkmalen wie beispielsweise Grundform oder Rohmaterial, auch die *thermische Veränderung* an. Die ersten beiden Eigenschaften auszuwerten, erschien wenig sinnvoll. So bestehen alle Artefakte, bei denen das Rohmaterial erkennbar war, aus Arnhoferer Hornstein. Und die Bestimmung der Grundform ist bei den häufig fragmentierten Stücken mit einem aufwendigen Bestimmungsschritt verbunden. Einfacher – aber immer noch etwas zeitaufwendig – ist es, die in der Regel auf den ersten Blick erkennbaren verbrannten Artefakte auszusortieren und ihren Anteil pro Viertelquadratmeter zu bestimmen. Man erhält so eine Untergruppe, die aufgrund ihrer Genese (Verbrennung) weitere wichtige Einblicke in die obertägigen Aktivitäten auf dem Bergwerk gewährt, da sie zur Lokalisierung von Feuerstellen beitragen kann. Anhand dieser Stücke betrachtet man also nochmals im Detail die Verlagerung von Haldenschichten – diesmal von solchen, die dem Feuer ausgesetzt waren.

Der *Anteil der verbrannten Stücke* lässt demnach wichtige Rückschlüsse auf die latenten räumlichen Strukturen innerhalb der Halde zu. Wenn diese Artefakte nicht von postneolithischen Verlagerungen betroffen waren, erlauben sie es indirekt, die Lage und Verlagerung ehemaliger Feuerstellen zu rekonstruieren. Ihre Verteilung zeigt dann, was mit den Schichten passierte, die mit Feuer in Berührung kamen.

Dabei ist nicht davon auszugehen, dass die verbrannten Stücke direkt in eine *Feuerstelle* gerieten. Viel wahrscheinlicher ist ein Szenario, bei dem Silexstücke schon auf oder in der Halde lagen, als “über ihnen“ später eine Feuerstelle entzündet wurde. Erst die nach unten wirkende Hitze griff die Stücke an und rief thermische Veränderungen hervor^{2.19}. Besonders die zahlreichen durchgeglühten Stücke müssen aber in Schichten gelegen haben, die sich direkt unter den Feuern befanden. Bei einem intensiven Verbrennen von Silex platzen von größeren Stücken unkontrolliert kleine Splitter ab und fliegen mehrere Meter weit. Dies kann zu schmerzhaften Verbrennungen führen und gefährdet das Augenlicht der Anwesenden. Steinzeitliche Menschen werden daher nur ungern Feuer direkt auf sichtbaren Artefaktkonzentrationen gemacht haben.

^{2.19} Die Reichweite, mit der die Feuerhitze in den Untergrund dringt, verringert sich mit zunehmendem Wassergehalt des Sediments. In den vor allem aus Sand und Kies bestehenden oberen Haldenschichten ist der Wasseranteil verschwindend gering. Dagegen wirkt die Luft der Bodenporen wiederum als Isolator – und der Anteil an Grobporen ist in solch einem Sediment eher hoch. Es ist daher schwer einzuschätzen, wie weit eine Hitze in den Untergrund drang, die ausreichte, um an den Silexstücken Verbrennungseffekte hervorzurufen. Wahrscheinlich, so meine Schätzung, “verbrannten“ die Artefakte unter dem Zentrum einer Feuerstelle nur bis in eine Tiefe von max. 2 Dm.

Vielleicht war dies auch einer der Gründe dafür, dass die jungsteinzeitlichen Bergleute zumindest die größere Artefakte mit in die aufgegebenen Schächte füllten (s. o.). Bei kleineren Artefakten ist die Gefahr von herumfliegenden, glühendheißen abgeplatzten Splintern sehr viel geringer. Man löste so gleichzeitig zwei Sicherheitsprobleme: das spontane Einstürzen unnötig offener Schächte und das Risiko von Verletzungen durch Splitter. Wegen dieser Problematik dürfte man auch vermieden haben, den eigenen Schlagabfall in oder neben ein Feuer zu kippen. Da die Halde aber mit Artefakten übersät gewesen sein muss, deckten die Neolithiker möglicherweise zunächst sogar Oberflächenpartien mit sterilem Sand zu, um die Feuerstelle auf einem von Silex freien Areal anzulegen.

Wenn die verbrannten Stücke überwiegend *unter den Feuerstellen* entstanden, so ist ihre Verteilung ein guter Hinweis auf die Lage der jeweils letzten Feuer, die auf der Halde angezündet wurden. Zeichnen sich Verlagerungen ab, so hat man neben der Artefaktdichte ein weiteres Indiz für die Reichweite und Richtung von Erdbewegungen. Ohne Verlagerungen der erhitzten Schichten ist die höchste Dichte zunächst in unmittelbarer Nähe der Feuerstelle zu erwarten. Strukturen, die von dort nach außen reichen, sind als Hinweis auf die Richtung zu werten, in die die Schichten nach dem Verlöschen der Feuerstelle verlagert wurden.

Für die Überlegungen zur Verteilung verbrannter Stücke waren drei *Befunde* mit Resten von Feuerstellen ausschlaggebend. Der Erste befand sich in der Südostecke der Ausgrabungsfläche (-34,5 O, 46,5 N; **Abb. 2.46**; zur Lage vgl. u. Abb. 2.47). Die Holzkohlekonzentration wurde zunächst fälschlicherweise für den Rest eines subrezentem Waldwirtschaftsfeuers gehalten^{2.20}. Erst nach dem Abgraben wurde erkannt, dass es sich um Holzkohle reiches Sediment gehandelt hatte, das in der Mündung eines aufgelassenen Schacht eingelagert war.

Östlich der eigentlichen Grabungsflächen wurden kurz vor Ende der Grabung nach Entfernung des Oberbodens in einem Bereich mit aktivem Kiesabbau noch zwei weitere gleichartige Befunde entdeckt und provisorisch dokumentiert (s. o. 2.1. "Feuerstellen" in Abb. 2.3). Dass es sich um verlagerte Reste von Feuerstellen handelte, konnte nur bei einer abschließend ermittelt werden. Sie zeigte bei der Grabung in aufeinander folgenden Plana eine Verkleinerung des Umrisses der Holzkohlekonzentration, die einen enger werdenden Schachtmund nachzeichnete.

^{2.20} Dabei wird ein von Schädlingen befallener Baum gefällt und das Kleinholz am Ort verbrannt. Dies geschieht entweder in einer frisch ausgehobenen Grube oder in der Vertiefung, die nach dem Entfernen des Wurzeltellers zurückbleibt. So wurde auch mit dem nach der Rodung des späteren Nordfeldes anfallenden Kleinholz verfahren. Dabei entstand außerhalb der späteren Grabungsfläche eine mit Holzkohle verfüllte Grube, die zu Beginn der Grabung als – irreführendes – aktualistisches Beispiel wirkte.

Im zweiten Planum gingen die Feuerstellenreste dann in die Verfüllung eines Schachtes über. Dieser Befund und der aus Feld 1 zeigt, dass die Feuerstellenreste zu Ende einer Aktivität in einen Schachtmund gefüllt wurden. Da Rötungen und verbackenes Sediment unter und neben den Holzkohlekonzentrationen fehlten, ist auszuschließen, dass es sich um Reste von Feuerstellen handelte, die direkt an der Stelle gebrannt hatten, an der die Holzkohle gefunden wurde.



Abb. 2.46: Abensberg-Arnhofen. Blick von Nord auf das Arbeitsprofil durch eine verlagerte Feuerstelle im Südosten der fundorientierten Haldengrabung. Die wannenartige Gestalt der Holzkohleeinfüllung in die Schachtmündung ist gut zu erkennen. Die Profillinie läuft zwischen den Koordinaten -34/46 und -35/46 (vgl. u. die blaue Linie in Abb. 2.47). Die Fluchtstange trägt Dezimeterteilungen. Die beiden Plana-Niveaus entsprechen den Plana 1 und 2. Auf dem tiefer liegenden Planum 2 zeichnet sich noch das untere Ende der Holzkohleschicht als kreisförmige Verfärbung ab.

Die Reste solcher Feuerstellen waren scheinbar überall in gleicher Weise von anthropogenen Erdbewegungen der Halde betroffen. Das belegen nicht nur verbrannte Hornsteinartefakte, sondern auch vereinzelte Holzkohleflitter und -bröckchen, die immer wieder in den untersuchten Haldenschichten auftraten. Dieses vereinzelte Auftreten ist nur durch Verlagerungen in der oben beschriebenen Weise erklärbar. Ganz ähnliche Spuren der Feuernutzung fanden sich auch im annähernd zeitgleichen Hornsteinbergwerk im niederbayerischen Flintsbach-Hardt (WEISSMÜLLER 1996, 26). Dort fand man ebenfalls Haldenschichten, die von Holzkohleflittern durchsetzt waren.

Aufgrund des Arbeitsaufwandes für die Merkmalsbestimmung wurde nur der *Anteil verbrannter Artefakte für einen Flächenausschnitt* bestimmt. Die Auszählung erfolgte als Zwischenschritt bei der Ziehung der Bergwerksstichprobe (Abb. 2.47; vgl. u. 3.2.1.).

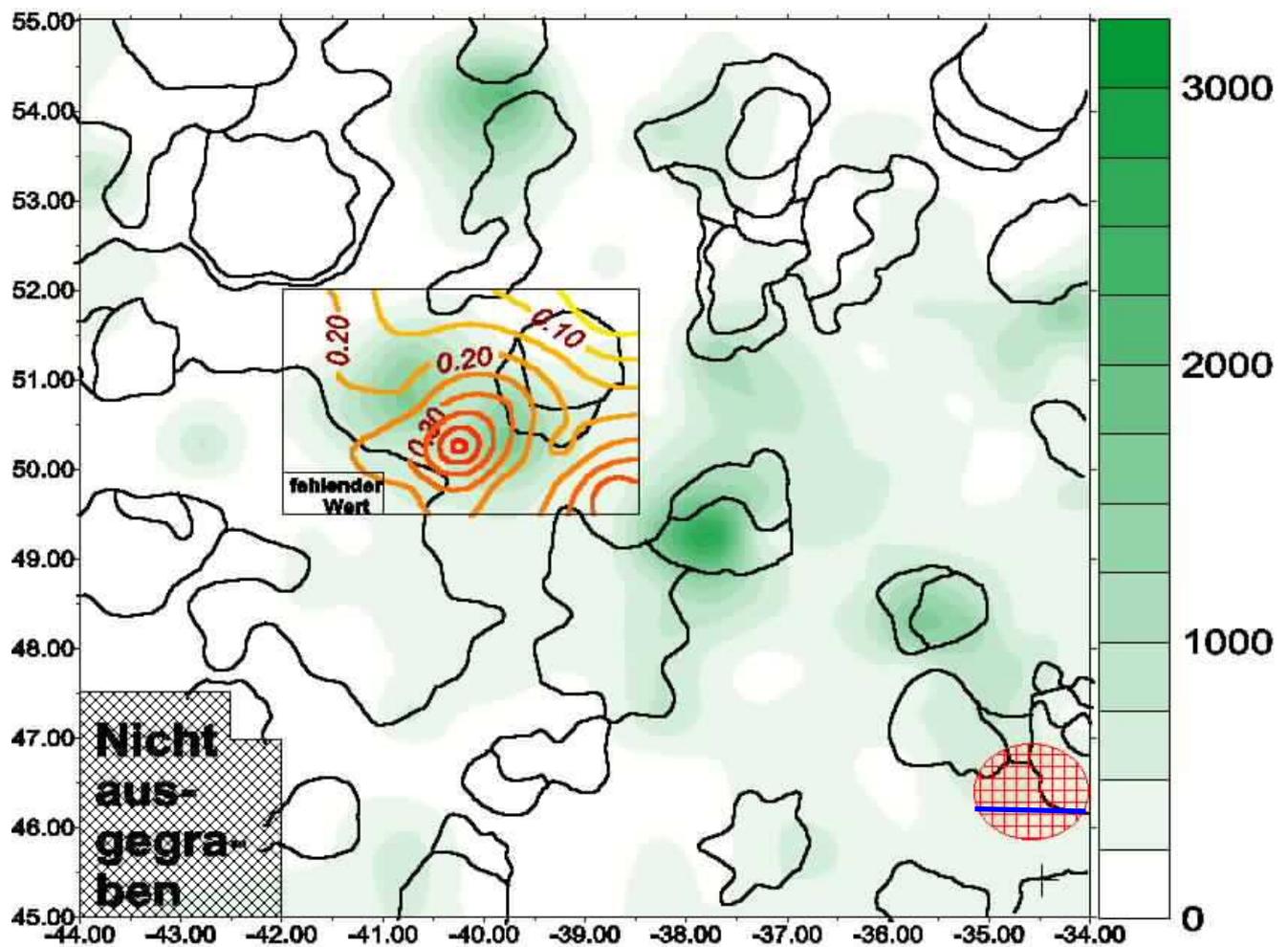


Abb. 2.47: Abensberg-Arnshofen. Verteilung der verbrannten Artefakte in einem Ausschnitt der fundorientierten Haldengrabung.

Die rötlichen dicken Isolinien im Ausschnittkasten geben die Anteile der verbrannten Stücke pro Viertelquadratmeter, abgestuft in Schritten von fünf Prozent, wider (0,10 = 10 %; zur Artefaktdichte s. o. Abb. 2.43). Die gerasterte rote Fläche im Südosten bezeichnet die ungefähre Lage der "eingefüllten" Feuerstelle aus Abb. 2.46. Die blaue Linie ist die Profilkante. In schwarzen Linien sind die Befunde des Planums 2 unterlegt. Für die in Kap. 3. bearbeitete Stichprobe wurde jeder zweite Quadrant des Ausschnittkastens bis auf einen Quadranten mit Bearbeitungsfehlern im Südwesten beprobt.

Von der in der Abbildung eingerahmten Konzentration wurden die verbrannten Stücke, beginnend in der Nordwestecke, für jeden zweiten Viertelquadratmeter bis auf einen fehlerhaften in der Südwestecke ausgezählt. Die Anteile verbrannte Stücke beziehen sich auf alle vorhandenen Funde. Sie umfassen auch die Artefakte kleiner als 10 mm. Daher weichen die Werte hier von denen der merkmalsanalytisch untersuchten Artefaktstichprobe ab (vgl. u. 3.2.3. Tab. 3.27).

Die Häufigkeit thermisch veränderter Stücke pro Viertelquadratmeter variiert zwischen 0 % und 48 %. Selbst bei dem kleinen Ausschnitt von 8,75 m² sind bereits deutlich zwei Konzentrationen von verbrannten Artefakten auszumachen.

Die eine liegt ungefähr zentral im untersuchten Ausschnitt. Ihr Mittelpunkt ist gegenüber dem einer benachbarten Artefaktkonzentration etwas versetzt.

Eine genauere Betrachtung der Konzentration von verbrannten Stücken zeigt den *Bezug zwischen Feuerstelle und Schacht*. Die Längsachse des ovalen Umrisses belegt mit der verzögerten Abnahme der Anteile nach Nordosten deutlich eine Verbindung zu dem dort liegenden Schacht (bei Ost -39,5 und Nord 51). Eine solche Beziehung ist am besten durch eine Verlagerung der Konzentration der verbrannten Artefakte in Richtung auf den Schacht hin zu erklären. Bei dieser Erdbewegung dürfte es sich um das Verfüllen des Schachtes aus Richtung der "Feuerstelle" gehandelt haben. An dem betreffenden Schachtmund ist zudem genau der Teil des Randes ausgebrochen, über den die Verfüllung wahrscheinlich erfolgte. Das ist gut an der randlich abgesetzten Verfüllungsschicht zu erkennen. So ein Kantenverlauf entstand, wenn an einem Punkt Erdreich über den Rand eines Schachtes geschoben oder aus entgegengesetzter Richtung hinein geschaufelt wurde. Die nur aus Kies bestehende Kante zwischen Schachtröhre und Rasensohle brach dann genau an der Stelle aus, wo sie am stärksten belastet wurde. Ein derartiger Befund weist also ebenso auf eine Verfüllung aus dieser Achse hin. Im vorliegenden Fall kann das Ausbrechen des Schachtrandes aber erst nach der Einfüllung der Schicht mit den verbrannten Artefakten erfolgt sein, denn sonst wäre hier die Konzentration thermisch veränderter Stücke an der Stelle des Schachtmundausbruches gekappt. Stattdessen nehmen die Anteile gleichmäßig ab. Wahrscheinlich war es eine Setzungserscheinung an den Randpartien, die zuvor am stärksten beansprucht worden waren. Sie erfolgte, nachdem der Schacht bereits weitgehend zugefüllt war.

Diese Beobachtung liefert außerdem den einzigen Hinweis auf die *Art der Schachtbefahrung*: Wie konnte man trotz der sehr fragilen Ränder eines Schachtmundes, die ja nur aus Kies bestanden, den Schacht befahren und den Versatz fördern? Für diese Aktivitäten kam nur die Seilfahrt in Frage. Dafür sprechen zwei Gründe. Für andere, größere Steighilfen war kaum Platz im Schacht vorhanden. Und das Anlehnen von Steighilfen an die Schachtwände oder den Rand hätte die Kies- und Sandwände bei Belastung sofort zum Einsturz gebracht.

Bei der *Seilfahrt* traten an der Seilauflage aber große Kräfte auf, die mit entsprechenden Vorrichtungen aufgefangen werden mussten. Und diese gaben die Kraft wieder an den Untergrund ab. Da die Seillager nahe am Rand oder über dem Schacht liegen mussten, kamen ihre Haltevorrichtungen direkt am Rand zu stehen. Während des Bergbaus wurden die fragilen Schachtränder also ständig unterschiedlich stark belastet. Und wie konnte man sich gefahrlos bis nahe an den Rand eines Schachtes bewegen, ohne dass das Körpergewicht zu einem Abbrechen des Randes führte?

Dafür gibt es nur eine einzige plausible Erklärung: Der Schachtmund war während des Abbaus von einer *Art Plattform* bedeckt. Am wahrscheinlichsten ist eine Konstruktion aus Flechtwerk, die wie ein Deckel mit einer Arbeitsöffnung in der Mitte den Schachtmund bedeckte. Dadurch wurden die Auflagekräfte am Schachtrand gleichmäßig verteilt und es konnte nicht zum Anschlagen des Fördergutes an den Rand des Schachtmundes kommen. Selbst bei eventuellen spontanen Abbrüchen des Schachtrandes war man auf einer solchen Plattform nicht gefährdet, da ihr Durchmesser wohl nach Erfahrungswerten größer als die Einsturzgrube angesetzt war, die bei einem Unfall entstehen konnten.

Für ein derartigen *Verbau des Schachtmundes* gibt es noch einen anderen, indirekten Beleg. Wie oben bereits bemerkt (s. o. 2.1.5.) und wie in der Altgrabung oftmals beobachtet, bildeten sich in den tieferen Bereichen der Schächte aus dem eingefülltem Material zunächst noch Schüttkegel, die erstaunlicherweise mehr oder weniger in der Mitte der Schachthöhe lagen. Sie konnten sich aber nur bilden, wenn die Verfüllung zunächst senkrecht von oben herab fiel und nicht an die Wände anstieß. Und dafür musste man den Versatz oben in der Mitte über dem Schacht auskippen. Das wiederum war nur möglich, wenn man unmittelbar am Rand stand. Demnach wurden manche Schächte senkrecht von oben verfüllt, also über die Arbeitsöffnung in der Plattformmitte. War der Schacht bis zu einem Punkt gefüllt, bei dem man nicht mehr mit einem gefährlichen Einsturz rechnen musste, entfernte man die Plattform. Von jetzt ab, ließ sich die Verfüllung arbeitssparend einfach über die Kante des Schachtes schieben.

Das erklärt auch die bessere *Erhaltung von Schachtwänden* in größerer Tiefe: In den untersten Bereichen eines aufgelassenen Schachtes schlug das hineingefüllte Material (fast) nicht an die Wände an. Es stürzte senkrecht von oben herab. Erst ab dem Augenblick, da nach dem Abbau der Plattform nur noch über die Kante verfüllt wurde, trafen die Verfüllladungen ständig die Wände, was dort zu immer stärkeren Beschädigungen führte. So wird auch das Profil von Schacht Nr. 212 verständlich (vgl. EISELE et al. 2003, 49 Abb. 19), das die Kreisarchäologie Kelheim 2003 publizierte. Die Schachtwände brachen erst aus, als die Verfüllung bis auf ein Niveau von etwa 2,5 m unter dem Schachtmund reichte. In den tieferen Abschnitten blieben sie erhalten, obwohl das eingefüllte Sediment dort mehr Schwung beim Auftreffen hatte.

Der *Plattfordurchmesser* lässt sich sogar schätzen. Wenn man davon ausgeht, dass der Einsturz eines Schachtes, der tiefer als 2,5 m war, noch als gefährlich erachtet wurde, muss man nur die ingenieursgeologischen Kennwerte zum Scherwinkel heranziehen (vgl. GRÜNDER 2003, 103ff. und Beilag1 10.1.1.). Danach hätte eine Flechtwerkplattform einen Durchmesser von etwa 3 m bis 4 m haben müssen.

Auf derartige Plattformen gibt es keinen einzigen direkten Hinweis. Ihre Existenz bietet aber wie gezeigt plausible Erklärungen für eine Reihe von Beobachtungen, die sonst nicht erklärbar sind. Die *Benutzung von Plattformen* liefert auch eine Antwort auf die Frage, warum man bei jeder Schachtgruppe mit einem eigenen Abstandsmaß arbeitete (vgl. o. 2.1.5.ff.). Dafür sei exemplarisch von einer etwa 4 m durchmessenden Flechtwerkscheibe ausgegangen, die genau in der Mitte eine etwa 1 m messende, kreisrunde Arbeitsöffnung besaß. Wenn man nun den Mittelpunkt des nächsten Schachtes genau am Rand der Scheibe markierte, bevor man sie vom ersten Schacht entfernte, so entstehen gerade Schachtabstände von knapp 2 m. Bei etwa 1 m Schachtdurchmesser und folglich einem Scheibenrand von noch ca. 1,5 m läge der Mittelpunkt des nächsten Schachtes genau bei 1,5 m plus 0,5 m (halber Durchmesser des alten Schachtes) also bei 2 m Entfernung vom Mittelpunkt des alten Schachtes. Wenn nun jede Arbeitsgruppe für jede Saison eine neue Plattform verwendete, so kämen alle Schächte dieser Saison annähernd im gleichen Abstand zu liegen. In jeder neuen Saison würde er durch die etwas anderen Dimensionen einer neuen Plattform etwas variieren.

Nach diesen Überlegungen zu allgemeineren Fragen der Bergbautechnik ist wieder zur *Fundverteilung der verbrannten Stücke* zurückzukehren. Wie gesagt zeigt die Form der Konzentration von thermisch veränderten Stücken, dass die Feuerstelle nach ihrer Aufgabe in den danebenliegenden Schacht verfüllt wurde. Bei den beiden oben beschriebenen Feuerstellen kamen die Reste ganz oben im Schacht nahe der Oberfläche zu liegen; ihre Umlagerung erfolgte also jeweils als letzte Aktivität bei der Aufgabe eines Schachtes. So war es auch bei der Feuerstelle, deren Lage durch die Interpolation erkennbar wird. Wäre sie zu einem früheren Zeitpunkt in den Schacht hineingeschoben worden, so müsste der Anteil der verbrannten Stücke rapide mit dem Erreichen des Schachtrandes abnehmen. Dies ist aber nicht der Fall. Der Umriss dieser latenten Struktur belegt damit, dass die während des Betriebes der Schächte angelegten Feuerstellen zum Abschluß der Verfüllungen als letztes oben in den Schachtmund eingefüllt wurden. Indirekt weist dies wiederum daraufhin, dass die überwiegend in den tieferen Schachtabschnitten genommenen Holzkohleproben keine direkte zeitliche Verbindung zu den Schächten haben müssen (vgl. o. 2.1.2. Tab. 2.1).

Mehrere der bisherigen Beobachtungen zeigen, wie die *Abfallentsorgung* in Arnhofen vor sich ging. Der beim Bergbau anfallende Abfall (Feuerstellen wie Schlagabfälle) wurde relativ spät im Verlauf der Verfüllung oben in die Schächte gekippt.

In Arnhofen beseitigten die Bergleuten also genauso wie im etwa zeitgleichen französischen Jablines (s. o.) die obertägigen Reste ihrer Aktivitäten, indem sie diese als letztes oben in die Schächte einfüllten. Man behandelte die Bergwerksfläche demnach nicht wie ein Verbrauchsgut, das nach der Benutzung sich selbst überlassen bleibt. Das Verhalten zeigt vielmehr, dass man dem Minenareal von Anfang bis Ende einer Bergbauaktivität besondere Aufmerksamkeit widmete. Sehr wahrscheinlich war die Verfüllung der Schächte in erster Linie eine Sicherheitsmaßnahme, die aus langer Erfahrung hervor gegangen war. Und bei den größeren Schlagabfällen aus Silex könnte es ähnlich gewesen sein. Die Beseitigung der Feuerstellenreste war dazu allerdings nicht nötig.

Bei dieser Praxis könnten auch *magisch-religiöse Vorstellungen* eine Rolle gespielt haben (vgl. u. 4.3.3.1.2.). Es darf schließlich nicht vergessen werden, dass in einer traditionellen, vormoder- nen Gesellschaft die Welt als Wirkungsbereich übernatürlicher Kräfte wahrgenommen wird. Alle erfolgreichen technischen Praktiken sind aus solch einer Sicht eine erfolgreiche Interaktion mit diesen Mächten. Bei der Anlage eines Schachtes kann es sich – aus der Sicht der neolithi- schen Akteure – also durchaus um eine derartige Tätigkeit gehandelt haben. Um zu klären, was genau hinter einem solchen Verhalten stand, bedürfte es einer genaueren Untersuchung der ritu- ellen Praktiken in der Münchshöfener Kultur für die hier nicht der Raum ist.

Die quantitative Analyse der Fundverteilung zeigte, welche Aktivitäten zur *Gestalt der Halde* beitrugen. Dabei handelte es sich um ein beim Bergbau ganz rationales Vorgehen, es sind aber auch nicht-rationale Aspekte erkennbar.

Ein Nebenaspekt der Erkenntnisse zur Genese der Halde ist, dass das in die Münchshöfener Kul- tur gehörende ^{14}C -Datum aus den Haldenschichten der Altgrabung eminentes Gewicht für die Datierung auch der hier untersuchten Flächen erhält.

Die Verteilung der verbrannten Stücke lässt aber noch weitere Schlüsse zur *Abfolge des Abbaus* zu. So weist die zentrale Konzentration von verbrannten Artefakten eine deutliche und scharf konturierte Abnahme der Anteile nach Südwesten zur Kante des flächigen Befundes auf. Dies kann mit der Kappung der ursprünglichen Verteilung durch eine später durchgeführte Erdbewe- gung erklärt werden. An dieser Stelle schließt sich räumlich der Befund an, für den oben disku- tiert wurde, ob er eine Art neolithischer "Suchschnitt" sei (s. o.). Demnach wurde er nach der Abbauphase angelegt, zu der die Feuerstelle gehörte.

Neben der bisher immer untersuchten Konzentration von verbrannten Artefakten im Zentrum der kleinen Interpolationsfläche gibt es noch eine zweite in der Südostecke. Sie wird in der Karte nur randlich erfasst. Die Zwanzig-Prozent-Isolinie trennt beide Konzentrationen am Südrand des Schachtes, in den die zentrale Konzentration verfüllt wurde.

Die Streuung der südöstlichen Konzentration zeigt keinen Bezug zu diesem Schacht. Vielmehr scheint sie auf einen Schacht orientiert zu sein, der direkt daneben, östlich außerhalb des untersuchten Ausschnittes liegt. In jedem Fall beweist diese Situation, dass der östlich anschließende Teil der Artefaktverteilung, zu der auch die hier diskutierten verbrannten Stücke gehören, *nach* der Bergwerksaktivität zustande kam, bei der die oben beschriebene verlagerte Feuerstelle und der zugehörige Schacht entstanden. Die Vorverlegung der Abbaufrent erfolgte also hier von West nach Ost.

Bisher zeigte sich, dass die Bergleute Feuerstellen auf der Rasensohle anlegten. Es wurde aber nicht klar, mit welcher *Anzahl von Feuerstellen* man rechnen darf. Nach den oben vorgestellten Aktivitätszonengrenzen gehört die durch die Interpolation nur randlich erfasste Feuerstelle in der Südostecke zur zentralen Schachtgruppe. Die vollständig erfasste Feuerstelle ist dagegen einer Aktivität weiter westlich zuzuordnen. Zusammen mit der umgelagerten HolzkohleKonzentration im Südosten von Feld 1 (s. o. Abb. 2.46 und Abb. 2.47 Südostecke) ist damit für drei der fünf Aktivitätszonen (s. o. Abb. 2.45) eine Feuerstelle belegt. Es ist also von mindestens einer Feuerstelle je Schachtgruppe auszugehen.

Neben der Auswertung einzelner räumlicher Verteilungen kann man auch mehrere interpolierte Phänomene kombinieren. Hier ist beispielsweise die Kombination von *Durchschnittsgewicht und Artefaktdichte* interessant, da so mögliche Verlagerungen von Konzentrationen besser zu erkennen sind (**Abb. 2.48**). Die einzelnen Konzentrationen wurden dafür mit Kleinbuchstaben von "a" bis "h" beziffert. Die Bezifferung beginnt im Nordwesten bei "a". Sie läuft jeweils nach Osten, springt bei Erreichen der Ostgrenze eine Zeile nach Süden und beginnt danach wieder im Westen. Es wurden insgesamt acht Artefaktkonzentrationen auf diese Weise bezeichnet. Eine genaue Betrachtung der Konzentrationen zeigt, dass fast alle gleichartige Beziehungen zu benachbarten Schächten aufweisen.

Das Vorgehen der Kombination verschiedener Verteilungen erlaubt es, Verbindungen zwischen *Schlagabfallkonzentrationen und Schachtmündern* zu ziehen. Mal ist eine Artefaktkonzentration einem Schacht direkt benachbart und die Längsachse der Konzentration – die "Schleifspur" bzw. der "Fächer" (s. o.) – weisen in seine Richtung. Mal liegt sie direkt über einem Befund.

Dann fächern die Ränder der Artefaktkonzentration in Richtung eines Bereiches mit niedrigem Durchschnittsgewicht aus. Diese Situation entspricht den oben formulierten Erwartungen zum Aussehen von Artefaktkonzentrationen nach ihrer Umlagerung. Bemerkenswert ist zudem, dass viele Schächte am Rand die oben beschriebenen Spuren eines Ausbrechens der Kante aufweisen, und zwar entweder passend zu der Richtung, aus der die Artefakte verlagert wurden, oder genau auf der entgegengesetzten Seite.

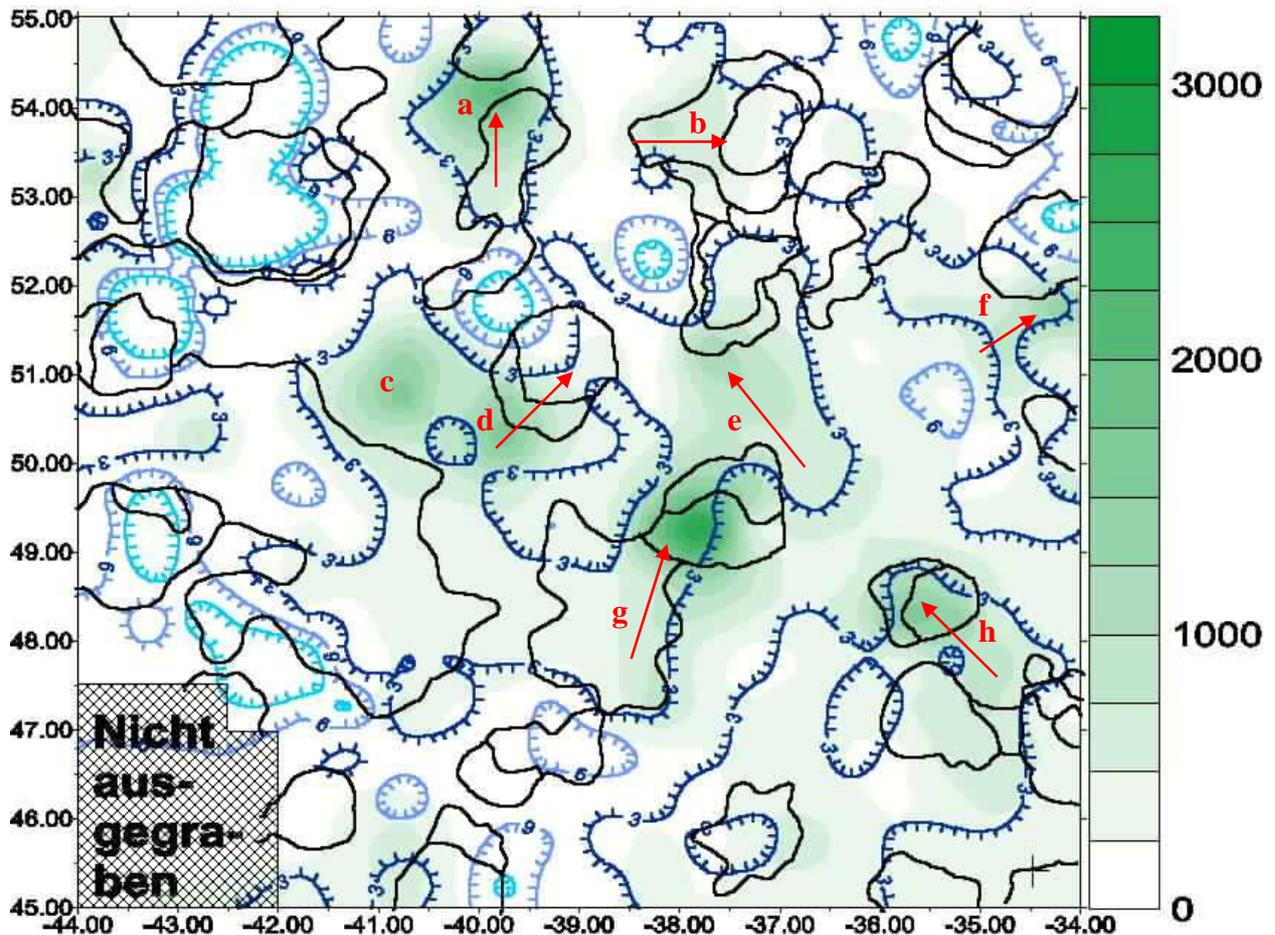


Abb. 2.48: Abensberg-Arnhofen. Interpretation der Fundverteilung in der fundorientierten Haldengrabung (Feld 1; vgl. o. Abb. 2.43).

Die roten Pfeile geben die Richtung an, in die Artefaktkonzentrationen (Kleinbuchstaben "a" bis "h") umgelagert wurden. In schwarzen Linien sind die Befunde des Planums 2 unterlegt.

Die folgenden Ausführungen zeigen die *Verbindungen zwischen Konzentrationen und Befunden*. Für Konzentration "a" ist aufgrund ihrer Längsachse und der Verteilung der Durchschnittsgewichte eine Verlagerung nach Norden anzunehmen. Hier zeigt die 3-Gramm-Isolinie und nicht die Artefaktdichte die erwartete Fächerform. Es bleibt aber unklar, welcher Befund hier als Zuordnung in Frage kommt. Stützt man sich auf die Isolinie des Durchschnittsgewichtes, wurde die Konzentration auf den am Nordrand der Fläche angeschnittenen Schachtmund hin verlagert.

Für *Konzentration "b"* ist wegen der nach Osten weisenden Auffächerung, eine Verlagerung von Westen her über den Befund zu vermuten. Der Schacht wurde demnach von Westen aus verfüllt. Die Auffächerung ist hier so stark, dass die Längsachse der Konzentration quer zur Richtung der Verlagerung verläuft. Da ihr Umriss beinahe exakt den Schachtmund nachzeichnet, wurde sie eindeutig in diesen hinein verlagert. Die Übereinstimmung zwischen den Umrissformen von Befund und Artefaktkonzentration ist besonders bemerkenswert. Die räumliche Verschiebung der beiden Formen gegeneinander um wenige Dezimeter kann auch der Methode geschuldet sein. Da die zugrunde gelegten Datenpunkte einen Abstand 0,5 m besitzen, wäre es eher überraschend, wenn die Umrisse völligen deckungsgleich wären. Unter den gegebenen Umständen ist die Übereinstimmung der verlagerten Konzentration und des Schachtmundes also besonders bemerkenswert. Artefaktkonzentration "b" wurde also kurz bevor die Schachtverfüllung beendet war, noch oben in den Schachtmund hinein geschüttet und zeichnet deshalb dessen Planumsumriss nach. Auch unabhängig von den Funden hätte man eine solche Verfüllung angenommen. Die Form des Schachtmundes belegt durch eine nach Westen zeigende, ausgebrochene Kante an dieser Stelle, dass die Verfüllung des Befundes genau über diese Kante erfolgte. Die Verlagerung nach Osten steht also in direktem Bezug zur Verfüllung dieses Schachtes. Die abschließende Verfüllung erfolgte, als der Rand des Schachtes schon ausgebrochen war, da die Artefaktkonzentration sonst diesen Randverlauf nicht nachgezeichnet hätte. Das beweist, dass der Schachttrand bei der Verfüllung des Schachtes ausbrach!

Dieses Zwischenergebnis ist im Hinblick auf die *Auswertbarkeit von Interpolationen* besonders interessant. Es zeigt, wie detailliert sich räumliche Phänomene in der Interpolation abzeichnen, die an den Befundgrenzen und dem Schichtverlauf in den Befunden erkannt werden können. Diese Übereinstimmung ist ein Beleg für die Qualität der Auswertungsmethode.

Die *Konzentration "c"* lässt sich nicht zuordnen. Wie bei "d" ist ihr Umriss zu rundlich, um eine Verlagerungsrichtung ableiten zu können. Nur wenn sie als Ergebnis einer Teilung bzw. der Verlagerung eines Teils von "d" entstand, kann sie wie die anderen einem Befund zugeordnet werden. Vielleicht handelt es sich aber auch um die in situ befindlichen Reste eines Schlagplatzes. Dagegen spricht allerdings das Fehlen von verworfenen Rohstücken und großen Kerntrümmern. In welche Richtung "d" verlagert wurde, ist mit Hilfe der verbrannten Artefakte aus dieser Konzentration eindeutig zu klären (s. o. Abb. 2.47). Die verbrannten Stücke wurden in Richtung des nordöstlich von "d" gelegenen Schachtmundes verlagert. Im Analogieschluss kann man also annehmen, dass die gesamte Konzentration "d" so umgelagert wurde.

Konzentration "e" wurde von Süd-Süd-Ost in Richtung des direkt nördlich gelegenen Schachtes verlagert. Das zeigen die Längsachse der Konzentration, die Fächerform des Umrisses, der Verlauf der benachbarten 3-Gramm-Isolinie parallel zur Fächerform und die breit ausgebrochene Kante des nördlich benachbarten Schachtmundes. Auch diese Verlagerung erfolgte kurz vor dem Abschluss der Verfüllung, da die Konzentration am Nordrand sonst scharf begrenzt sein müsste.

Konzentration "f" dagegen wurde von Süd-West in Richtung des nordöstlich davon gelegenen Schachtes verlagert. Die Hinweise darauf sind der leicht fächerförmige Umriss der Konzentration und die Ausrichtung ihrer Längsachse sowie eine genau in den Schachtmund hinein weisende Ausbuchtung der Drei-Gramm-Isolinie.

Bei der *Artefaktkonzentration "g"* belegen wiederum Längsachse, Umriss und Durchschnittsgewicht, dass hier eine Verlagerung von Süd nach Nord in den dort gelegenen Schachtmund erfolgte. Zwar weist der keine entsprechend ausgebrochene Kante auf, doch belegen die Ost-West orientierten, mandelförmig aneinander gelagerten Verfüllungsschichten, dass der Schacht nur von Nord oder Süd verfüllt worden sein kann. Verfüllungsrichtung und Artefaktverlagerung sind also gut zu vereinbaren.

Bei *Konzentration "h"* sprechen Fächerform, Längsachse und Verlauf der Drei-Gramm-Isolinie eindeutig für eine Verlagerung in Richtung des direkt west-nord-westlich gelegenen Schachtmundes. Hier brach der Schachtrand aber einmal auf der Seite aus, die der Konzentration gegenüberlag. Der Schacht wurde also noch bis kurz vor seiner vollständigen Auffüllung zugeschippt. Und dabei trafen immer wieder Ladungen die gegenüberliegende Seite und ließen dort die Kante einbrechen. Besonders dieser Befund lässt sich gut mit der oben in 2.1.5. entwickelten Hypothese zur Bewertung der Verfüllungsrichtung verbinden. Es zeigt sich, dass man im Planum sogar noch kurz unter der Oberfläche eben nur die Verfüllungsachse feststellen kann.

Aus methodischen Gründen darf man die oben beschriebenen Aktivitätszonengrenzen und die verlagerten Konzentrationen **nicht** zueinander in Bezug setzen. Beide Phänomene sind nämlich voneinander abhängig. Ihnen liegt die Betrachtung des gleichen Auswertungsergebnisses (Artefaktdichtekarte) aus unterschiedlichen Blickwinkeln zugrunde. Würde man trotzdem solche Bezüge postulieren, ergäbe sich die Gefahr von Zirkelschlüssen.

Allerdings lässt sich die Verfüllungsrichtung der beiden Schächte, die zur zentralen Aktivitätszone (Schachtgruppe) gehören, auch anhand von Erkenntnissen zur Verfüllungsabfolge bestimmen. Und da zeigt sich, dass der ausgebrochene Rand des nördlichen und die Schichtstruktur der Verfüllung des südlichen Schachtes jeweils gut mit der Längsachse der nach der Funddicke bestimmten Schachtgruppe vereinbar sind (vgl. o. Abb. 2.45).

Abschließend ist zu diesem Punkt zu bemerken, dass die hier untersuchten Bezüge zwischen den Konzentrationen, ihren Verlagerungsrichtungen und den Schächten wider Erwarten als besonders eng und deutlich zu bewerten sind, wenn man die Lage der Ausgangsdaten mit ihrem Raster von 0,5 m berücksichtigt. Demnach wären eigentlich Unschärfen von bis zu 3 Dezimetern bei der exakten Lokalisierung der Phänomene zu erwarten gewesen. Schließlich waren die Befundgrenzen auf dem Planum 2 von Feld 1 meistens nur unscharf zu erkennen. Man kann daher nicht genau bestimmen, auf welche Weise sich die Schachtmünder nach oben weiteten. Trotz dieser Unsicherheitsfaktoren konnte die Untersuchung der latenten Strukturen in der Halde aber zur Klärung der Frage nach der Lage und Größe von Bergbauaktivitäten beitragen.

Stellt man die *Ergebnisse* dieses Abschnittes und die der vorangegangenen einander gegenüber, so ergänzen sie sich auf erstaunliche Weise (**Abb. 2.49**).

Die nach den linearen Trends der geringsten Artefaktdichte ermittelte Schachtgruppe in Feld 1 weist eine *Orientierung* auf, wie sie nach der Orientierung der zunächst benachbarten Gruppen im befundorientierten Haldenareal (L 13 / intensiv gelb, U 05 / hellgrün und P 04 / lila) und derjenigen im direkt südlich gelegenen Bereich der Kiesgrubensohle (P 03 / dunkelblau) zu erwarten war.

Der *Umriss* der Gruppe im Feld 1 entspricht in seiner Form auch noch genau demjenigen der polygonen Gruppen aus dem westlich gelegenen Areal.

Aber nicht nur das, auch die *Größe* dieser polygonen Gruppe ähnelt auffallend der zentralen Gruppe in Feld 1.

Und schließlich war anhand der verbrannten Artefakte zu erkennen, dass die Vorverlegung der *Abbaufont* von West nach Ost und damit senkrecht zur Achse der Gruppe in Feld 1 erfolgte (vgl. o. Abb. 2.47 und 2.48). Dies entspricht genau der Vorverlegung der *Abbaufont*, die bei der Bildung der Schachtverbände in der Kiesgrube hypothetisch angenommen wurde – und rechtfertigt diese Annahme nachträglich.

Die Eigenschaften der Aktivitätszonen, die an den linearen Trends der geringsten Artefaktdichte zu erkennen sind, und die bisher vorgenommene Schachtgruppenbildung stützen sich also in mannigfaltiger Weise gegenseitig. Dabei basieren die Resultate auf völlig verschiedenen Grundlagen, der Schachtverteilung einerseits und der Fundverteilung andererseits. Die Schachtgruppenbildung auf den befundorientierten Grabungsflächen erfolgte mittels Triangulation der *Befunde* und berücksichtigte die Funde nicht. Die Ermittlung der umgrenzten Flächen auf der fundorientierten Haldengrabung erfolgte durch Berechnung der linearen regionalen Dichteminima der *Funde*.

Diese Methode wiederum nahm keine Rücksicht auf die Lage der Befunde. Die beiden Resultate sind von einander völlig unabhängig. Die Übereinstimmung der unterschiedlichen Ansätze ist daher besonders bemerkenswert.

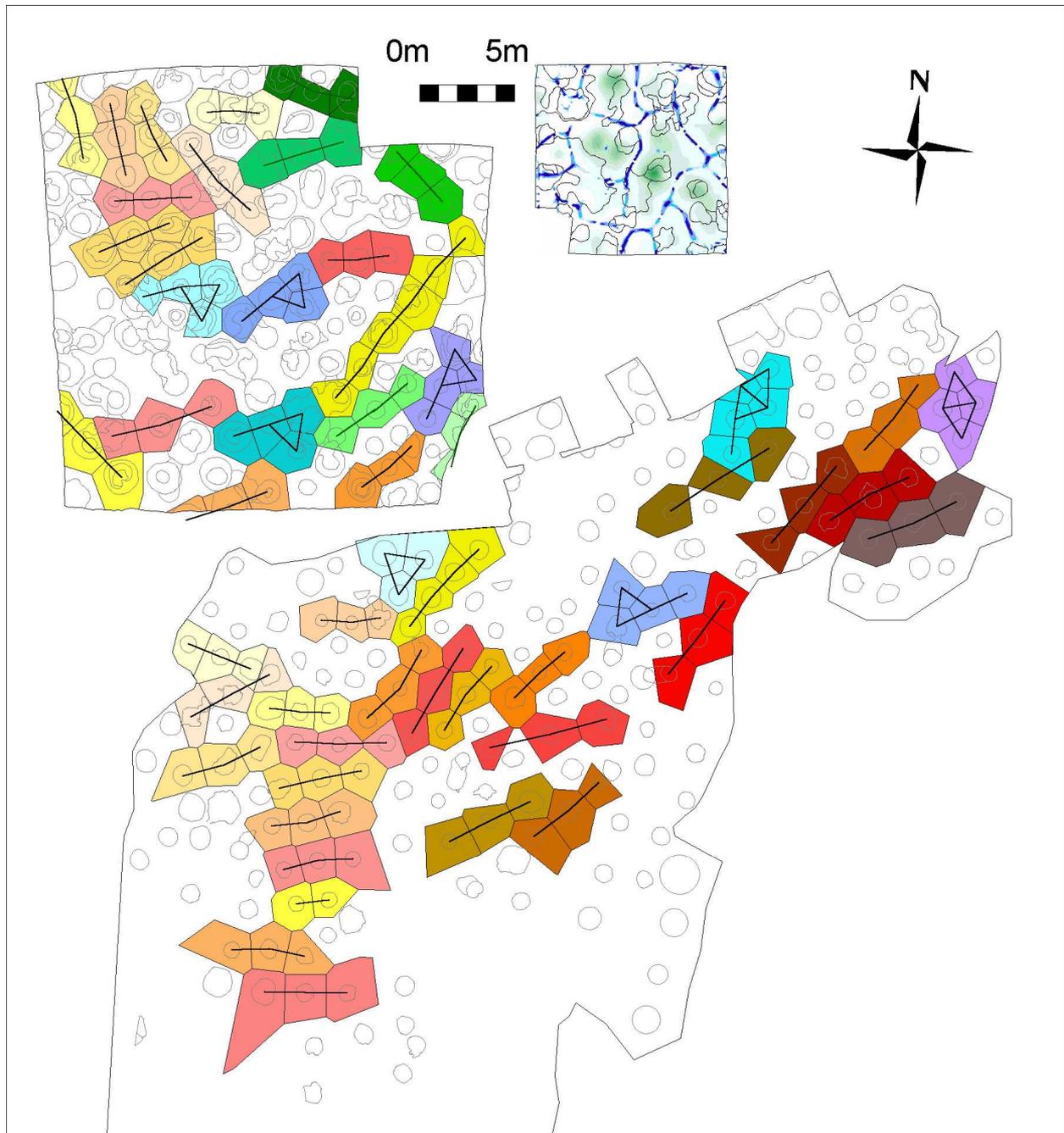


Abb. 2.49: Abensberg-Arnhofen. Vergleich der beiden Ansätze zur Schachtgruppenbildung. Die nach der Artefaktdichte ermittelte Schachtgruppe im nordöstlichen Feld 1 besitzt die gleiche Ausrichtung wie die südwestlich und südöstlich liegenden Gruppen. Sowohl ihr Umriss als auch ihre Größe entsprechen beinahe exakt den Thiessenpolygonflächen der weiter westlich oder südlich gelegenen polygonen Gruppen.

Die Untersuchung der fundorientierten Haldengrabung ergab: *Anhand der Funddichte konnte das Areal einer Bergbauaktivität gegen die Umgebung abgegrenzt werden. Größe, Umriss und Ausrichtung entsprechen den bisherigen Erkenntnissen zu den Schachtgruppen. Die Vorverlegung der Abbaufont erfolgte senkrecht zur Längsachse dieser Schachtgruppe. Die Raumnutzung umfasste neben dem eigentlichen Bergbau auch noch ein abschließendes "Aufräumen", bei dem Schlagplätze und Feuerstellenreste zum Schluss oben in die aufgelassenen Schächte eingefüllt wurden.*

Auch dieses Pflegen der benutzten Flächen spricht übrigens indirekt dafür, dass die Bergbautrupps einen besonderen Bezug zu den von ihnen genutzten Arealen hatten. Es ist ein indirekter Hinweis darauf, dass die in 2.1.6. vermuteten Claims ein plausibles historisches Bild für den Bezug zwischen Benutzergruppen und Bergwerk zeichnen.

Dass sich die Ergebnisse der auf verschiedenen Quellen aufbauenden unterschiedlichen Methoden gegenseitig stützen, spricht im Nachhinein für die *Validität der verschiedenen Ergebnisse*. Die Untersuchung der Befundverteilung und der Fundverteilung mit verschiedenen Methoden, Triangulation, Tessellierung und Punktfeldstatistik einerseits, Interpolation und Plankurvatur andererseits, kommt zu übereinstimmenden Ergebnissen. Die oben immer wieder angemerkten Fehlerquellen besaßen also keinen größeren Einfluss auf die Ergebnisse.

Diese Ergebnisse erlauben bereits einen *Ausblick* zu weiteren Anwendungsmöglichkeiten der bisher verwendeten Methodenkombination. Sie empfiehlt sich auch für zukünftige wirtschaftsarchäologische Untersuchungen, bei denen genug Artefakte und Befunde zur Verfügung stehen. Das betrifft in erster Linie Bergwerke, aber auch Verhüttungsplätze mit Öfen und Schlackenverteilungen wären bei entsprechender Datenaufnahme ein vielversprechender Einsatzort. Das gleiche gilt für Siedlungen, bei denen man die Beziehung zwischen Verarbeitungsabfällen und Gebäuden untersucht, um Aktivitätszonen zu identifizieren. Die Liste der Anwendungsmöglichkeiten bei anderen archäologischen Fragestellungen, etwa aus dem Bereich der Siedlungsarchäologie, ließe sich noch deutlich verlängern. Besonders die methodische Analyse von Interpolationen und ihre Kombination bergen noch ungeahnte Möglichkeiten.

2.3. Rohstoffverteilung im Untergrund und abgebaute Mengen

Neben der Fläche und der Schachtdichte ist die mögliche Ausbeute einer Bergbauaktivität eine weitere wichtige Information für die Einschätzung der wirtschaftshistorischen Bedeutung eines Bergwerks.

Im Fall von Arnhofen ist daher die *Hornsteinausbeute* interessant, die man aus einem Schacht fördern konnte. Dies wurde bereits von Engelhardt und Binsteiner erkannt. Sie untersuchten daher, wieviel Rohstoff in einem Kubikmeter Flöz auftritt (BINSTEINER 1990, 13 u. Tab. 3; ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 26). Aus der Ergiebigkeit eines Kubikmeters schlossen sie, dass ein neolithischer Schacht ungefähr 10,95 kg brauchbares Rohmaterial erbrachte. Allerdings lagen die untersuchten Flöze z. T. außerhalb der Bergwerksfläche im Schnitt E (BINSTEINER 1990 Beil. 2), also dort wo die Neolithiker schon keine Schächte mehr angelegt hatten.

Um Aussagen zu den möglichen Fördermengen auf eine breitere Basis zu stellen, wurden während der Grabungskampagnen im Herbst 2000 und im Sommer 2001 insgesamt 9 *Rohstoffsondagen* angelegt (**Abb. 2.50**). Sie wurden bereits in tabellarischer Form vorgestellt (EISELE u.a. 2003b). Hier erfolgt eine weitergehende Auswertung.

In der Grabung zeigte sich beim Erreichen des Niveaus der Schachtweitungen, dass das Flöz sowohl bei der Ergiebigkeit als auch bei der Mächtigkeit große Schwankungen innerhalb von wenigen Metern Entfernung aufwies. Vereinzelt setzte es sogar kurzfristig aus. Diese Eigenschaft des Flözes geht höchstwahrscheinlich auf die Auswirkungen des Karstprozesses zurück (s. u. und vgl. o. 1.5.; GRÜNDER 2003, 35 Abb. 35, 67 Abb. 50, v. a. 61 und Anl. 3.1.), der den Untergrund unter dem Flöz nach dessen Bildung noch veränderte. Aufgrund des von der Kreisarchäologie veranschlagten hohen Arbeitsaufwandes pro Sondage und anderer Grabungsprioritäten war es leider nicht möglich, diese variationsreiche Situation mit einer angemessen großen Zahl an Sondagen zu erfassen.

Die schließlich angelegten Sondagen befanden sich sowohl innerhalb als auch am Rand der Bergwerksfläche. Es wurde dabei ein anderes Vorgehen als in den 1980er Jahren gewählt. Um die Werte der Sondagen möglichst gut mit der potentiellen Ausbeute von Schächten verbinden zu können, wurde nicht eine im Voraus festgelegte Volumenmenge Hornsteinflöz untersucht. Stattdessen grub man auf einer festgelegten Fläche mit rechtwinkligem Umriss senkrecht nach unten, bis das gesamte Flöz durchstoßen und der Malm erreicht war^{2.21}.

^{2.21} Die Schächte wurden normalerweise bei Erreichen des Malms aufgegeben. Nur wenige sind ein bis drei Dezimeter in den Jurakalk eingetieft – und das erfolgte vermutlich nur dort lokal, wo das Gestein extrem stark verwittert war (GRÜNDER 2003, 23 und 69) und deshalb ohne große Probleme herausgebrochen werden konnte.

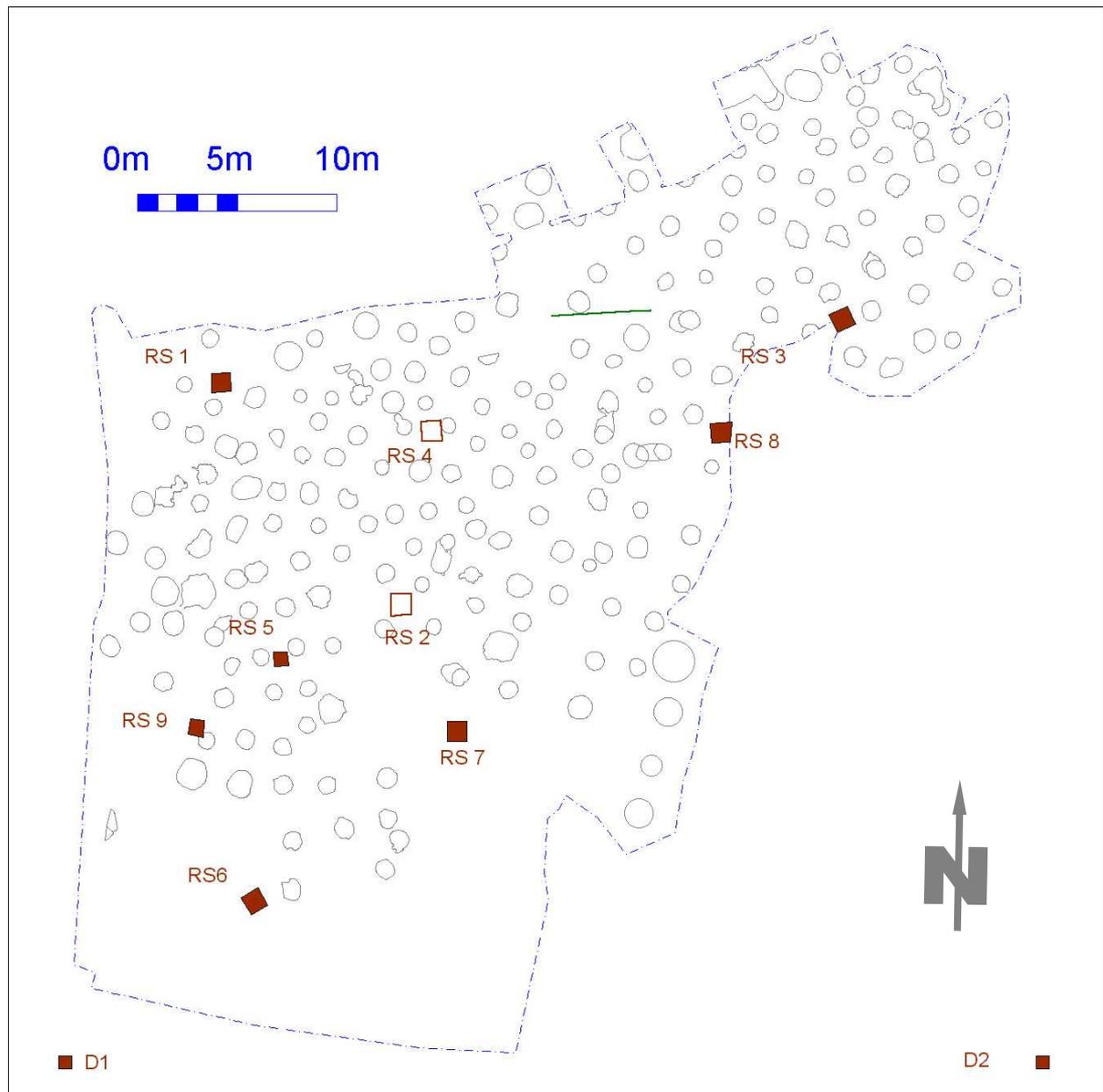


Abb. 2.50: Abensberg-Arnhofen. Lage der Rohstoffsondagen auf der Grabungsfläche in der Kiesgrube. Sondagen die zu weiteren Berechnungen verwendet werden, sind mit einem gefüllten, unvollständige Sondagen sind mit einem leeren Symbol dargestellt. Die mit "D" bezeichneten Objekte sind zwei für die Interpolation künstlich eingesetzte Datenpunkte mit dem Wert Null. Die grüne Linie markiert die Lage des Profils durch eine Doline, das in Abb. 2.52 abgebildet ist.

Die *Ausgangsfläche* der Sondagen betrug zumeist einen Quadratmeter, nur die Flächen von Nr. 5 und Nr. 9 waren mit $0,49 \text{ m}^2$ bzw. $0,64 \text{ m}^2$ etwas kleiner. Für die statistische Auswertung wird ihre Ausbeute jedoch als repräsentativ betrachtet und auf einen Quadratmeter hochgerechnet. In diese Untersuchung wurden gegenüber der Erstpublikation auch zwei Sondagen (Nr. 6 und 7) einbezogen, die bis auf das Niveau der maximalen Schachttiefen (ca. 358,80 m NN) reichten.

Zusätzlich wurden für die spätere Interpolation am Südrand der Grabung, dort wo ausweislich des Kies- und Sandabbaus auf dem Niveau der maximalen Schachttiefen kein Flöz mehr anzutreffen war, zwei hypothetische Datenpunkte, "D 1" (x -67, y -8) und "D 2" (x -17, y -8), eingefügt, deren Werte in allen Kategorien auf Null gesetzt wurden.

Die Anlage der erfolgreichen *Sondagen* erfolgte an Stellen, wo von einem Planum aus das Einsetzen eines Flözbereiches erkannt werden konnte, der vom neolithischen Abbau ungestört blieb. Sondage Nr. 2 und Nr. 4 konnten aus sicherheitstechnischen Gründen nicht bis auf das Niveau des Malms bzw. der maximalen Schachttiefen abgetieft werden. Ihre Fundleere stellt also keinen repräsentativen Befund dar. Sie wurden daher nicht in die weitere Auswertung einbezogen. Bei der Aufgabe von Nr. 4 konnte an der Sohle bei 361 m NN noch das Einsetzen eines Flözes dokumentiert werden. Nr. 2 war wie Nr. 1 noch vom Planum 4 begonnen worden und hätte, um das Flöz zu erreichen, abgestützt werden müssen. Sie wurde deshalb aufgegeben. Bei allen anderen Sondagen startete der Aushub erst vom Planum 5 oder 6 aus.

Mit dem Vorgehen, die *Flözergiebigkeit* unter einer Fläche zu dokumentieren (**Abb. 2.51**), wurde ein Ansatz gewählt, der dem beim neolithischen Bergbau sehr ähnlich ist. Auch die Schächte erschlossen von oben das Flöz und durchstießen es bis auf den Jurakalk bzw. bis zur technisch möglichen Maximaltiefe eines Schachtes. Da auch die Schächte im Planum, also in der Fläche, erfasst wurden, können die archäologischen Daten mit den Werten aus den Sondagen gut verbunden werden. Das Vorgehen stellt die bisher genaueste Charakterisierung der Lagerstätte im Bereich der Bergwerksfläche aus der Sicht der neolithischen Nutzung dar.

Das mit den Sondagen angeschnittene *Hornsteinvorkommen* liegt überwiegend in den Molassesanden wenige Dezimeter oberhalb der Malmoberkante (vgl. o. 1.5.). Nach ingenieurgeologischen Experimenten zur Lagerstättengenese geht die Einlagerung des jurassischen Hornsteins in die miozänen Sande auf die Ersetzung von gelöstem Kalk durch nachrieselnde Sande zurück (GRÜNDER 2003, 38 und 45ff.). Nur die Sondagen Nr. 1 und Nr. 9 erfassten Hornsteinvorkommen in den Altabensschottern. Diese entstanden vermutlich entweder dadurch, dass Schotter nach dem Einsturz unterirdischer Dolinen in die entstandenen Hohlräume nachrutschte (ebd. 53ff. v. a. 67 Abb. 50), und danebenliegende Hornsteine mitgerissen und so in die Kiese eingelagert wurden.

Die ingenieurgeologischen Untersuchungen belegen die Fortdauer eines vermutlich seit der Kreidezeit ablaufenden *Karstprozesses* auch nach der Abdeckung durch die Sande der Oberen Süßwassermolasse im Miozän und die Altabensschotter im mittleren Pleistozän. Die Einlagerung von Hornstein in Schotter könnte aber auch ähnlich der Einlagerung in die Molassesande verlaufen sein.

Danach wäre bei einem Karstereignis Abensschotter zunächst bis knapp über die Kalkoberkante gelangt. Nach der Lösung des darunterliegenden Kalkes ersetzte er ihn und umschloss so die Hornsteine.



Abb. 2.51: Abensberg-Arnhofen. Blick von Planum 5 (unterer Bildrand) in die Rohstoffsondage Nr. 8. In den Wänden aus weißgrauem Molassesand sind bis zu 0,8 m über dem Malmkalk die platten- und fladenförmigen Rohstücke zu sehen. Gut erkennbar ist die variable Mächtigkeit des Flözes, seine unregelmäßig verlaufende Oberkante sowie der Bezug zwischen Verlauf der Malmoberkante und der Flözoberkante. Die Teilungen des Maßstabes sind Dezimeter.

Dolineneinbrüche führten unter anderem dazu, dass über den Dolinen gelegene Teile des Flözes mit in die Tiefe gerissen wurde. An dieser Stelle setzt also das ansonsten in erreichbarer Tiefe liegende Flöz aus (GRÜNDER 2003, 61 und Anl. 3.1.).

Das vereinzelte Aussetzen des Flözes kann auch eine bisher unverständliche Lücke im ansonsten sehr dichten Schachtanlagemuster erklären (vgl. o. Kap. 2.1.6. Abb. 25: Lücke nordwestlich von P 02/himmelblau).

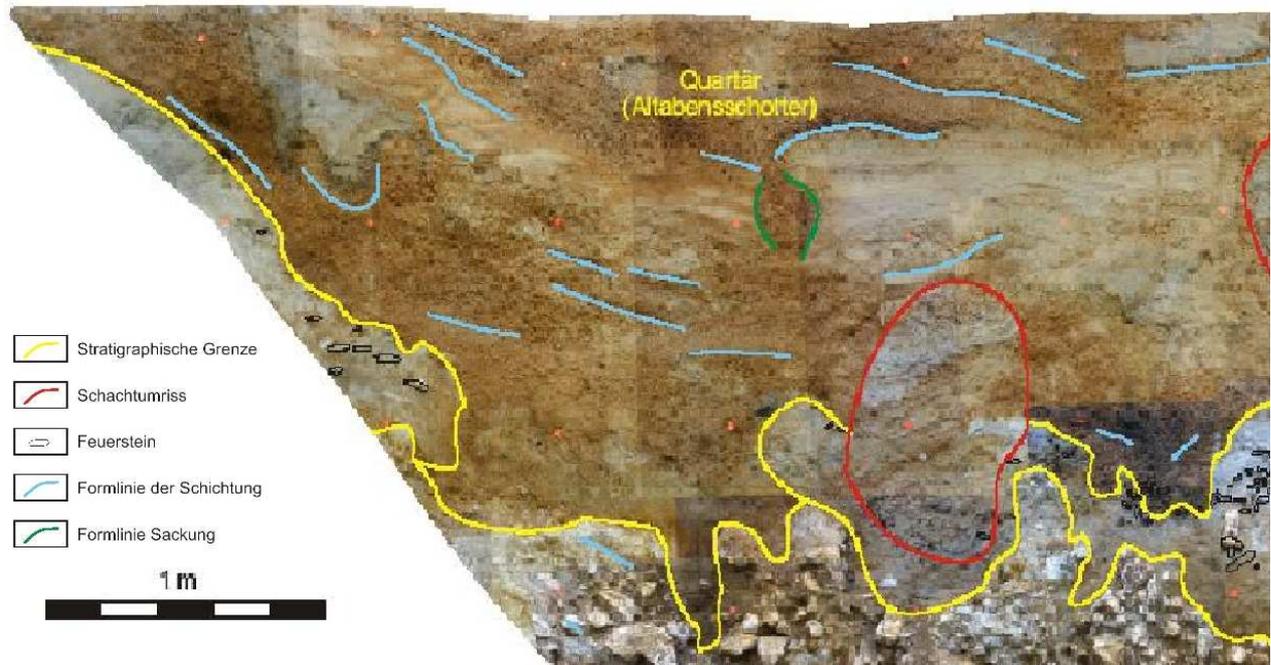


Abb. 2.52: Abensberg-Arnhofen. Blick auf das Profil durch den Westteil einer Doline (GRÜNDER 2003, Anl. 3.1.).

Deutlich ist das Aussetzen des Flözes im Zentrum der Doline (links unten) zu erkennen. Die Profilloberkante ist das Planum 4 auf 362,25 m NN (= ca. 4,3 m unter Oberfl.). Der "Schachtumriss" ist das Profil durch eine Weitung. Zur Lage des Profils auf der Grabungsfläche s. o. Abb. 2.50.

Die in **Abb. 2.52** dargestellte Doline reicht im Planum weiter nach Norden. Genau hier befindet sich die Lücke in der Schachtverteilung (s. o. Abb. 2.50).

Abbauplanung und Flözgeologie standen in engem Bezug zueinander. Lokal ungünstige bergbau-technische Gegebenheiten veranlassten die Neolithiker, an solchen Stellen fast keine Schächte anzulegen. Das erklärt die Unmöglichkeit, in diesem Bereich Gruppen zu bilden ebenso wie die Abweichung vom angenommenen Verteilungsmodell (s. o. 2.1.4.2.). Als Folge der Lücke im regelmäßigen Schachtanlagemuster war es an dieser Stelle auch nicht möglich, einen Schachtgruppenverband zu bilden. Die sich zwischen den Verbänden C und F auftuende Lücke (s. o. Kap. 2.1.6.) ist also das Ergebnis der geologischen Situation. Sie war keine Folge einer Störung bei Planung und Organisation des Abbaus.

Nach diesem Beweis für den engen Zusammenhang zwischen geologischer Situation und Schachtverteilung könnten auch die anderen Flächen mit eher lockerer Schachanlage im zentralen Bereich des Ostrand des Grabungsfläche durch ähnliche Phänomene verursacht worden sein. Im Umkehrschluss legt dies noch einmal nahe, dass die sonst zu beobachtende Regelmäßigkeit nur Ergebnis eines absichts- und planvollen menschlichen Verhaltens sein kann.

Die *Lagerstätten* im Bereich der Projektgrabung besitzen eine andere Genese als die bei der Altgrabung beprobte Lagerstätte (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 26). Prinzipiell wurde aber beide Male, 1984 und 2001, dasselbe Vorkommen erfasst, wie auch die Zusammensetzung des Flözes noch zeigen wird. In der heute mit Bauschutt verfüllten Kiesgrube "Buchenrieder" wurde der Hornstein in einer Schicht aus Verwitterungston angetroffen, die direkt über dem Malm lag. Diese Schicht fehlte bei den Aufschlüssen in der Kiesgrube "Brandl". Hier waren die Hornsteine aus der Molasse z. T. mit einer wenigen Millimeter starken, grünlichem Tonschicht überzogen, möglicherweise dem letzten Rest des ursprünglichen Residualtons. Der restliche Ton könnte beispielsweise durch die Verlagerung der Tonpartikel in die Zwischenräume des karstenden Kalkes abgeführt worden sein. Auch ein höherer Mergelgehalt der Kalke in der Grube "Buchenrieder" könnte die unterschiedliche Gestalt der Lagerstätten in beiden Aufschlüssen erklären. Die östlich gelegene Parzelle "Buchenrieder" liegt näher zum Zentrum der Abensberg-Pullacher-Wanne (vgl. GRÜNDER 2003, 16 Abb. 15), dem geologischen Überrest einer jurassischen Flachwasserlagune. Im Zentrum einer solchen Lagune könnte aber der Anteil in den Kalk eingelagerter Feinpartikel höher gewesen sein, als an ihrem Rand.

Der neolithische Bergbau zielte auf das *leicht erreichbare Hornsteinflöz*, das sich knapp über dem Jurakalk im Lockergestein (Sand oder Kies bzw. Ton) erstreckte. Das zeigen sowohl die Ergebnisse der Altgrabung als auch die DFG-Projektgrabung (vgl. ENGELHARDT/BINSTEINER 1988; BINSTEINER 1990). Ein Abbau der im Jurakalk eingelagerten Hornsteine war in der Regel nicht beabsichtigt. Der Arbeitsaufwand war also beim Arnhofener Bergbau längst nicht so hoch, wie bei vielen anderen neolithischen Bergwerken, in denen das Rohmaterial aus einem umgebenden Felsgestein heraus gebrochen werden musste. Dieses mühselige Kalkbrechen war sicher auch bei manchen anderen, den Neolithikern bekannten, obertägigen Hornsteinaufschlüssen im Jura der weiteren Umgebung notwendig.

Der vermeintlich zusätzliche *Kraftaufwand* durch die bergmännische Gewinnung relativiert sich, wenn man bedenkt, wie leicht das Deckgebirge aus Kiesen und Sanden abgebaut werden konnte, welches das Flöz nur in einer Mächtigkeit von etwa 2,5m (Kiesgrube "Buchenrieder"; ENGELHARDT 1988, 5) bis 7,5 m überdeckte.

Das Lockergestein konnte mit neolithischen Holzspaten oder Grabwerkzeugen aus Schulterblattknochen leicht abgestochen werden. Manche Partien hätte man sogar mit bloßen Händen abgraben können.

Das *Rohmaterial* von Arnhofen tritt in verschiedenen Formen auf: Platten, flache Knollen, sog. Fladen, und stärker gewölbte Knollen (ENGELHARDT/BINSTEINER 1988, 5). Während die Unterscheidung zwischen Platten und den anderen beiden Formen stets eindeutig möglich ist, ist dies bei der Abgrenzung von Fladen und Knollen nicht der Fall. Da bei den Artefakten aus Arnhofener Hornstein nur die Stücke aus plattigem und nicht plattigem Rohmaterial unterschieden werden können^{2.22}, werden Fladen und Knollen zusammengefasst. Dies ist auch wegen der Verarbeitungseigenschaften, durch die sich die Platten positiv von den restlichen Rohformen unterscheiden, gerechtfertigt.

Bei der *Auswertung der Sondagen* musste anders vorgegangen werden, als in der Erstpublikation. Die dort getroffene Unterscheidung verschiedener *Qualitätsstufen* ("sehr gut", "gut") bezieht sich auf die Größe und nicht auf die Homogenität der Rohmaterialstücke (vgl. EISELE et al. 2003b, 66 und 67 Tab. 2). Da die Größe der Rohstücke aber nicht mit der von Restkernen in Beziehung gesetzt werden kann^{2.23}, wird auf eine Weiterverwendung dieser Klassifikation verzichtet und beide Größenklassen zur Klasse "brauchbares Rohmaterial" zusammengefasst. Als ein weiterer Unterschied zur Vorabpublikation wurde hier bei allen Schritten auf die Einbeziehung von Rohstücken, die kleiner als 4 cm mal 4 cm sind, verzichtet^{2.24}. Diese Stücke waren wegen ihrer geringen Größe für die Neolithiker nicht von Interesse. Jeder Archäologe mit Erfahrung im Silexschlagen weiss, dass man die noch kleiner ausfallenden Kerne kaum noch in der Hand halten könnte.

^{2.22} Die Unterscheidung ist bei den Artefakten deutlich an der Art der im Silex erkennbaren Struktur möglich. Bei den Stücken, die von Platten abgetrennt wurden, gibt es eine planparallele Bänderung aus unterschiedlich gefärbten Streifen. Bei den von Knollen oder Fladen abgeschlagenen Stücken besteht die innere Struktur stattdessen aus konzentrischen oder gewellten, streifenartigen Zonen verschiedener Färbung.

^{2.23} Das Gewicht wäre hier das sinnvolle Vergleichsmerkmal.

^{2.24} Diese Stücke sind ausweislich eines Vergleiches der originalen Zähllisten mit der Publikation in die dortige Kategorie "unbrauchbar" aufgenommen worden (EISELE et al. 2003b, Tab. 2), obwohl im kommentierenden Text eine anders lautende Aussage gemacht wird (EISELE et al. 2003b, 65). Als Problematisch ist dabei auch die Aussonderung von Platten unter 2 cm Dicke anzusehen (ebd.), weil solche Stücke durchaus noch verarbeitet wurden (s. u. 3.2.5.2.). Beispielsweise sind nur 23 der 63 Plattenkerne aus dem mittelneolithischen Mitterfecking überhaupt dicker als 20 mm! Diese Problematik wurde bei der Auszählung leider nicht berücksichtigt und kann deshalb hier nicht mehr rückgängig gemacht werden.

Ergiebigkeit der Lagerstätte auf 1 m ² bei variabler Mächtigkeit (SONDAGEN)													
Sondage- Nummer	Platten				Knollen und Fladen				Summen				
	Brauchbare Platten		unbrauch- bare Platten		Brauchbare Knollen		unbrauch- bare Knollen		Alle brauch- baren Stücke		Alle Stücke		
	Anzahl	Kg	Anzahl	kg	Anzahl	kg	Anzahl	kg	Anzahl	kg	Anzahl	kg	
1 (1,0)	n %	53 8,7	7,05 9,7	234 38,2	23,77 32,5	94 15,3	22,20 30,3	85 13,9	20,16 27,5	147 24,0	29,25 39,0	613 100	73,18 100
3 (1,0)	n %	440 16,8	40,51 19,7	1050 40,2	96,53 47,0	246 9,4	45,93 22,4	192 7,4	22,58 11,0	686 26,2	86,44 42,1	2614 100	205,54 100
5 (0,49)	n %	106 13,4	12,68 8,8	327 41,1	75,05 51,8	106 13,4	46,95 32,4	43 5,4	10,22 7,1	212 26,7	59,63 41,2	794 100	144,91 100
6 (1,0)	n %	0 0	0 0	7 46,7	2,42 19,7	4 26,7	7,16 58,2	4 26,7	2,71 22,1	4 26,7	7,16 58,2	15 100	12,29 100
8 (1,0)	n %	85 5,2	13,51 8,3	744 45,3	66,31 40,8	148 9,0	36,91 22,7	433 26,4	45,67 28,1	233 14,2	50,42 31,1	1643 100	162,40 100
9 (0,64)	n %	27 7,3	6,31 6,2	148 41,0	51,82 51,1	70 19,4	36,52 36,0	20 5,6	6,68 6,6	97 26,7	42,84 42,3	363 100	101,34 100
Durch- schnitt	n %	118 11,8	13,3 11,4	418 41,6	52,65 45,2	111 11,1	32,61 27,8	130 12,9	18,0 15,4	230 22,8	46,0 39,4	1007 100	116,6 100
7 (1,0)	n %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Hochrechnung auf Ergiebigkeit von 1 m ³ Lagerstätte (KUBIKMETER)													
1 (0,5)	n %	106 8,7	14,10 9,6	468 38,2	47,55 32,5	188 15,3	44,41 30,3	170 13,9	40,31 27,5	294 24,0	58,50 40,0	1226 100	146,36 100
3 (1,4)	n %	314 16,8	28,94 19,7	750 40,2	68,95 47,0	176 9,4	38,1 22,4	137 7,4	16,13 11,0	490 26,2	61,74 42,1	1867 100	146,81 100
8 (0,6)	n %	142 5,2	22,52 8,3	1240 45,3	110,51 40,8	247 9,0	61,52 22,7	722 26,4	76,12 28,1	388 14,2	84,03 31,1	2738 100	270,66 100
Durch- schnitt	n %	187 9,6	21,85 11,6	819 42,2	75,67 40,3	203 10,5	46,24 24,6	343 17,6	44,19 23,5	391 20,1	68,09 36,2	1944 100	187,95 100
1988 (1,0)	n %	25 k.A.	5,35 11,4	k.A. k.A.	24,8 53,0	k.A. k.A.	16,55 35,4	k.A. k.A.	0,1 0,2	k.A. k.A.	21,9 46,8	k.A. 100	46,8 100
Durch- schnitt	n %	106 k.A.	13,6 11,6	k.A. k.A.	50,24 42,8	k.A. k.A.	31,39 26,7	k.A. k.A.	22,15 18,87	k.A. k.A.	45,0 38,3	k.A. 100	117,38 100

Tab. 2.5: Abensberg-Arnhofen. Ergiebigkeit der Rohstoffsondagen.

Berücksichtigt wurden alle Stücke größer als 4 cm x 4 cm. In der Zeile "Durchschnitt" sind die Mittelwerte aller rohstoffführenden Sondagen angegeben (ohne Nr. 7). Bei der Auflistung der Sondagen sind die zugrunde gelegten Flächen (in m²) und bei der Hochrechnung die ungefähren realen Volumen (in m³) der Sondagen in Klammern angegeben^{2,25}. Die hier angegebenen Werte sind bereits entsprechend auf die Fläche von 1 m² bzw. das Volumen von 1 m³ hochgerechnet.

^{2,25} Die Daten der Ausgrabung der 1980er Jahre wurden Binstener (ders. 1990, 13 u. Tab. 3) sowie Engelhardt und Binstener entnommen (dies. 1988, 26).

Sie sind daher von allen folgenden Erwägungen zu Rohmaterialausbeute und Verhältnis zwischen brauchbarem (homogenem) und unbrauchbarem oder taubem (inhomogenem) Material ausgeschlossen. Gleichzeitig ist aber taubes Rohmaterial größer als 4 cm mal 4 cm in die hier verwendeten Zahlen mit eingeschlossen, um das Verhältnis von gutem zu unbrauchbarem Material zu untersuchen. Die Rohmaterialmenge aus den Projektsondagen ist ohne Umrechnung nicht mit den Zahlen der 1980er Jahre zu vergleichen, da dort genau ein Kubikmeter Flöz untersucht wurde (anders EISELE et al. 2003b, 66). Für diese Auswertung wurde das mit den Sondagen tatsächlich erschlossene Volumen berücksichtigt und die Werte entsprechend hochgerechnet. Aus diesen Punkten ergeben sich die Abweichungen zwischen **Tabelle 2.5** und den bereits publizierten Daten (EISELE et al. 2003b, 66 Tab. 1 und 67 Tab. 2).

Bei allen folgenden Verteilungskennwerten und Hochrechnungen ist zudem zu berücksichtigen, dass die ermittelten Werte von der Problematik einer zu geringen Stichprobenzahl beeinträchtigt sein könnten (vgl. o.). Besonders die im Folgenden durchgeführte Interpolation hätte bei besserer Datenlage das räumliche Phänomen Rohmaterialdichte auch detaillierter abbilden können. Höchstwahrscheinlich wäre dabei auch die kleinräumig stark schwankende Rohmaterialdichte besser erfasst worden. Durch den Mangel an Sondagen kann diese Interpolation die Struktur des Flözes also nur als groben Trend wiedergeben.

Zu den beiden Sondagen mit geringem bzw. aussetzendem Rohstoffvorkommen ist Folgendes zu bemerken. Die Sondage Nr. 6 liegt genau am Rand der Schachtverteilung, Nr. 7 schon außerhalb der Bergwerksfläche. Letztere wurde daher nicht in die Durchschnittsbildung einbezogen. Mit der nur wenig Hornstein erbringenden Nr. 6 wurde eine spezielle Situation erfasst. Die dort festgestellte Menge stellt einen kritischen Wert dar. Bei derartigen Mengen stellten die Neolithiker den Abbau ein. Es handelt sich also um die Untergrenze der für abbauwürdig erachteten Flözergiebigkeit. Diese Sondage wird daher in die Berechnungen mit einbezogen.

Im Allgemeinen zeichnet sich das mit den Sondagen erschlossene Flöz durch enorme *Hornsteinmengen* aus, sowohl was die Stückzahlen, als auch was das Gewicht betrifft. Die Ausbeute, die eine Sondage lieferte, hing mehr von der Mächtigkeit des Flözes ab, als von seiner sich ändernden Zusammensetzung. Im Mittel wurden über 100 kg Silex festgestellt (116,6 kg). Davon sind wiederum ca. 40 % nutzbares Material (Durchschnitt 46,0 kg). Die Flözmächtigkeit in Nr. 3 ist mit ungefähr 1,4 m überdurchschnittlich hoch, so dass hier mit über 86 kg guten Rohmaterials bei insgesamt 205,5 kg Hornstein die größte Ausbeute erzielt wurde.

Die *Variabilität der Ausbeute* an gutem Hornstein ist allerdings sehr hoch. Die Werte schwanken zwischen 7 kg am Bergwerksrand und 86 kg weiter im Inneren. Einzelne Schächte erbrachten also höchst unterschiedliche Mengen. Abseits des Südrandes war den Neolithikern eine Ausbeute von mindestens 29 kg (Sondage Nr.1) möglich, wenn sie nicht auf eine Doline stießen. Bei der Anlage von mehreren Schächten in einer Gruppe dürfte sich die Schwankung der Ergiebigkeit im Regelfall wieder so relativiert haben, dass die Neolithiker stets mit einer bestimmten Menge an brauchbarem Hornstein "rechnen" konnten. Die Ausnahme bildet die oben vorgestellte Doline. Vielleicht begegnete man der grundsätzlichen Unsicherheit des Ausbeuteumfanges damit, dass bei der Planung des Abbaus von vornherein mehrere Schächte – in der Regel drei (s. o. 2.1.7.) – angestrebt wurden. Es ist auch denkbar, dass man nach nur einem oder zwei Schächten wieder aufhörte, wenn diese bereits soviel Hornstein ergeben hatten, wie man fördern wollte.

Ein Blick auf die Zahlen der Tabelle 2.5 zeigt die *Zusammensetzung des Flözes*. Die höchsten Werte treten stets bei den unbrauchbaren Platten auf. Dies ist durch das relativ häufige Vorkommen kleinerer Plattenbruchstücke bedingt. Zwischen den Sondagen treten zwar größere Unterschiede in einzelnen Kategorien auf, insgesamt aber erscheint das Flöz recht einheitlich. Es ist überwiegend aus plattigen Stücken zusammengesetzt (53,4 % aller Stücke, 56,6 % des Gewichts). Die Durchschnitte von Platten und Knollen zeigen zudem, dass die brauchbaren Knollen im Vergleich zu den anderen Kategorien überdurchschnittlich viel wiegen (11,1 % aller Stücke, 27,8 % des Gewichts). Nach den durchschnittlichen Anteilen am Gesamtgewicht besteht das Flöz zu etwa 11 % aus brauchbaren und zu etwa 45 % aus unbrauchbaren Platten sowie zu knapp 28 % aus brauchbaren und zu etwa 15 % aus unbrauchbaren Knollen und Fladen. Knollenförmige Rohstücke machen über 70 % des Gewichtes des brauchbaren Rohmaterials aus! Die häufig erfolgende Gleichsetzung von Arnhofener Hornstein mit Plattenhornstein ist nicht durch die Geologie des Vorkommens verursacht. Sie geht alleine auf die bevorzugte Gewinnung, Verarbeitung und Weitergabe des Plattenhornsteins durch die neolithischen Menschen zurück!

Eine Spezialisierung auf die Nutzung *plattigen Rohmaterials*, wie er für das Mittelneolithikum wahrscheinlich ist (s. u. 3.2.1. Tab. 3.4), bedeutete den Verzicht auf bis zu zwei Drittel des Gewichtes an brauchbarem Rohmaterial. Daraus ergibt sich ein bemerkenswerter Schluss: Der Hornstein wurde im frühen Mittelneolithikum um des Tausches willen gefördert, denn verarbeitet und getauscht wurden fast nur plattiges Material. Während dieser Zeitstufe (ca. 4950 v. Chr. bis 4750 v. Chr.) kann Arnhofener Hornstein deshalb zu recht als Ware bezeichnet werden, denn es handelt sich um ein Produkt menschlicher Arbeit, das überwiegend für den Tausch hergestellt wurde (HEINRICH 2005, 37ff.).

Gleichzeitig ist der Umgang mit diesem Produkt aber keineswegs effizient in einem marktwirtschaftlichen Sinn, da der überwiegende Teil des brauchbaren Materials – in Form der Knollen – verworfen wurde! Vollzeitspezialisierte Bergleute wären auf keinen Fall so mit dem mühsam geförderten Hornstein umgegangen. Während der vorangehenden, mehrhundertjährigen handkeramischen Nutzung des Bergwerks ist das Überwiegen der Förderung für den Tausch noch nicht zu erkennen (vgl. u. 3.2.2.), in dieser Zeit müsste Arnhofener Hornstein also als Gut bezeichnet werden (vgl. u. 4.1.3.).

Der hohe Anteil an taubem Material erforderte stets eine intensive *Rohmaterialprüfung* des geförderten Hornsteins. Von den Hornsteinplatten sind durchschnittlich nur etwa 20 % (118 von 536) aller Stücke verarbeitungswürdig, bei den Knollen sind es etwa 46 % (111 von 241). Dies erklärt die enorm hohen Artefaktzahlen in den Haldenschichten. Die Materialprüfung war am besten vor Ort mit Testabschlägen durchzuführen, wenn kein überflüssiges Gewicht in die Siedlungen getragen werden sollte. Eine bevorzugte Nutzung von Platten senkt allerdings eher die Zahl an notwendigen Tests. Bei diesen Stücken ist es leichter, die Qualität schon mit dem Auge einzuschätzen. So hängt die Qualität zumeist einfach von der Plattenstärke ab (BINSTEINER 1990, 31ff.). Auch sind die vermutlich während der tertiären Alpenaufaltung entstandenen und später wieder verkieselten Klüfte^{2.26} bei den Hornsteinplatten oft schon von außen auf der Rinde zu erkennen, während sie bei den Knollen häufig erst durch Tests festgestellt werden können.

Für den korrekten *Vergleich der Ergiebigkeit* von einem Kubikmeter Flöz zwischen den Kiesgruben "Brandl" (Grabung des DFG-Projektes) und "Buchenrieder" (Grabung der 80er Jahre) konnten nur drei Sondagen herangezogen werden (Nr. 1, 3 und 8), bei denen Profilaufnahmen bzw. Niveauangaben eine Abschätzung der Flözmächtigkeit und somit eine Hochrechnung auf die Ergiebigkeit eines Kubikmeters ermöglichten. Die Umrechnungen auf einen Kubikmeter Flöz führen bei den Gewichts durchschnittswerten zu mehreren Unterschieden (Vergleich der Zeilen "Durchschnitt" zwischen "SONDAGEN" und "KUBIKMETER"). Die Anteile des Gewichts gehen bei den unbrauchbaren Platten von 45,2 % auf 40,3 % zurück (Sondagen bzw. Kubikmeter). Bei den brauchbaren Knollen verläuft der Gewichtsrückgang von 27,8 % zu 24,6 % (Sondagen bzw. Kubikmeter).

^{2.26} Für den freundlichen mündlichen Hinweis auf eine bisher m. W. noch nicht beschriebene Eigenschaft des Arnhofener Hornsteins danke ich Herrn Dipl. Geol. Alexander Binstener. Das Auftreten dieser Klüfte als reflektierende Schichtgrenze im ansonsten isotropen Material kann nach eigener Erfahrung das regelmäßige Bruchverhalten stark beeinträchtigen. Bei eigenen Versuchen wurde daher bei Knollen stets eine erste Abbaufäche präpariert und ein oder zwei Klingen entfernt, um zu prüfen ob das Material auch wirklich ein regelmäßiges Bruchverhalten aufwies.

Bei den unbrauchbaren Knollen steigen sie dagegen (15,4 % in Sondagen, 23,5 % im Kubikmeter). Während diese Werte sich verändern, bleibt der Anteil des Gewichts brauchbarer Platten erstaunlich stabil (11,4 % in Sondagen; 11,6 % im Kubikmeter).

Bei der Grabung der 1980er Jahre wurde nur für die Platten die Stückzahl angegeben, ansonsten liegen nur Gewichtsangaben für die einzelnen Kategorien vor. Das damals beprobte Vorkommen lag ca. 150 m östlich von den hier vorgestellten Sondagen^{2.27}. Es erbrachte nur ein Viertel des Gewichtes an Hornstein (46,8 kg statt 187,95 kg), während der Gewichtsanteil des brauchbaren Materials um zehn Prozentpunkte und damit um knapp ein Viertel (46,8 % statt 36,2 %) höher lag. So betrug die absolute Ausbeute an brauchbarem Material auch mit 21,9 kg weniger als ein Drittel der durchschnittlich 68,1 kg in den Sondagen des Projektes. Während die relativen Anteile des Gewichts unbrauchbarer Platten und brauchbarer Knollen in den Projektsondagen jeweils um über zehn Prozentpunkte (40,3 % statt 53,0 % bzw. 35,4 % statt 24,6 %) geringer ausfallen, ist der Anteil des Gewichts unbrauchbarer Knollen wesentlich höher als in den 1980ern (23,5 % statt 0,2 %). Bei all diesen Unterschieden ist es deshalb besonders bemerkenswert, dass der Anteil des Gewichts brauchbarer Platten am gefördertem Hornstein auf dem hier vorliegenden Unsicherheitsniveau als identisch anzusehen ist (11,6 % bzw. 11,4 %). Dies ist bei aller Variabilität der Flözzusammensetzung zwischen den Lagerstätten in den Molassesanden (Projektsondagen 2001) und denen im Residualton (1980er Jahre) die Konstante zwischen den beprobten Regionen. Am Anteil des Gewichtes brauchbarer Platten zeigt sich, dass *trotz höchst unterschiedlicher Geologie in den 1980ern und 2001 grundsätzlich dasselbe Vorkommen aufgeschlossen wurde*.

Demnach war auch für die neolithischen Bergleute mit jedem Erreichen des Flözes eine gewisse Menge an Plattenhornstein sicher, wenn nicht gerade eine Doline angeschnitten wurde. Obwohl es also auf den ersten Blick so aussieht, als ob der Abbau im Bereich der Altgrabung wenig ergiebig gewesen wäre, konnten die Neolithiker zumindest überall den gleichen Anteil an guten Platten erwarten.

Die *Interpolation* der Menge an brauchbarem Hornstein pro Quadratmeter durchgrabenen Flözes erfolgte wiederum mit der Methode "Kriging" in der Software "Surfer 32" (**Abb. 2.53**). Geschätzt wurde die Ausbeute auf dieser Fläche Flöz in einer für die Neolithiker noch erreichbaren Tiefe.

^{2.27} Die genaue Lokalisierung der beprobten Bereiche im Plan wurde nicht publiziert. Der Abstand zwischen den DFG-Sondagen und der Rohmaterialsondage der Altgrabung konnte daher nur grob geschätzt werden.

Für die mathematische Schätzung der Rohmaterialdichte kam ein idealisiertes Semivariogramm vom Typ 'spherical' unter der Annahme von Isotropie zum Einsatz (Semivariogramm s. u. Anhang 6.1.1.2.). Für den Parameter Schwellenwert ('sill') wurde der Wert 650 und für die Reichweite ('range') 23 m gewählt. Die Sondagen wurden alle mit ihrem jeweiligen Messwert einbezogen (s. o. Tab. 2.5.: Spalte "brauchbare Stücke, Gewicht") und die beiden hypothetischen Punkte "D1" und "D2" gingen mit dem Wert "0" in die Interpolation ein.

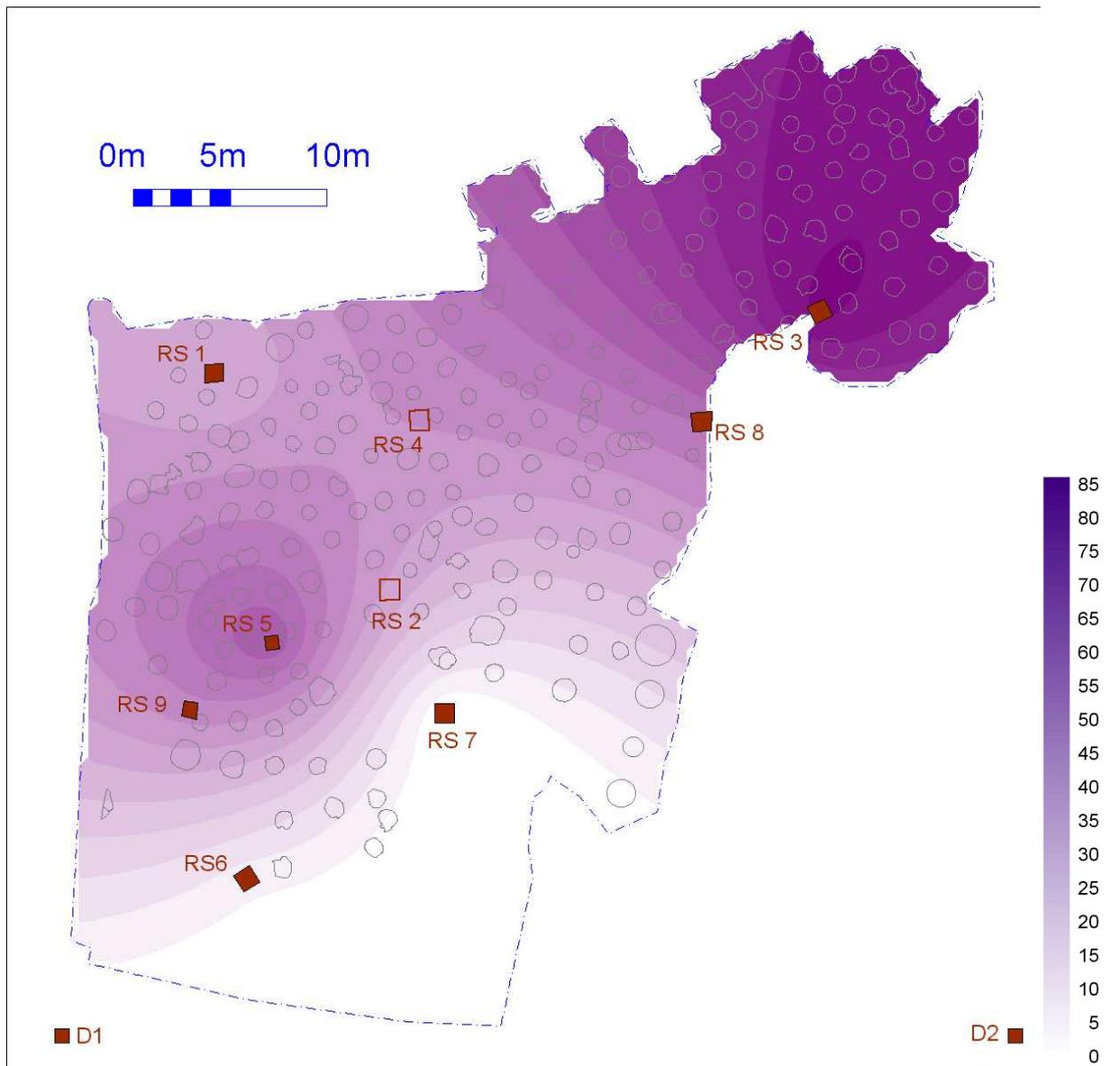


Abb. 2.53: Abensberg-Arnhofen. Interpolation des Gewichtes an brauchbarem Rohmaterial pro Quadratmeter Flöz für die Kiesgrube.

Das Gewicht in kg-Isohypsen abgetragen (Legendenbalken rechts). Als Datenpunkte wurden die Mittelpunktskoordinaten der benutzbaren Rohstoffsondagen (vgl. Text; RS: gefüllte Symbole) und die beiden artifiziellen Nullwerte (D) verwendet.

Die Randlinien des Gitternetzes liegen bei den Koordinatenlinien $Y_{\min.} = -9$ (Südrand) und $Y_{\max.} = 45$ (Nordrand) bzw. $X_{\max.} = -17$ (Ostrand) und $X_{\min.} = -68$ (Westrand). Die Auflösung beträgt 0,2 m im Quadrat (Größe der Rasterpixel). Die Ergebnistrasterkarte besteht demnach aus 271 waagrechten Linien und 256 senkrechten Linien.

Die hier präsentierte Schätzung kann wegen der geringen Anzahl von Messpunkten (Sondagen) nur als eine Visualisierung der Rohmaterialverteilung angesehen werden. Das Netz aus Sondagen war nicht engmaschig genug, um die mikroregionale Variation des Flözes repräsentativ abbilden zu können. Die Interpolation ist also keine so detailgenaue Schätzung wie etwa Abb. 2.43. Es war nur möglich, den allgemeinen räumlichen Verteilungstrend des Hornsteinflözes grob zu lokalisieren. Die Schätzkarte in Abb. 2.53 entspricht also einer Art gleitendem Mittel, das die in den Sondagen belegte hohe Varianz der Flözmächtigkeit nur abgeschwächt darstellt.

Folgende Beispiele zeigen die Problematik der Rohmaterialdichte-Interpolation. Beispielsweise schätzt das Verfahren fälschlich (!) für den Flächenausschnitt, in dem ausweislich des Dolinenprofils das Flöz aussetzt (vgl. o. Abb. 2.50), einen Ertrag von 60 kg bis 70 kg. Die geringe Sondagenzahl führte wahrscheinlich auch zu dem vermeintlich west-nord-westlich von Sondage Nr. 7 einsetzenden Silexreichtum. Die Höhe der Ausbeuteschätzung für diesen Ausschnitt ist daher ebenfalls zum Teil als rechnerisches Artefakt zu betrachten. Grund ist die unzureichende Erfassung der räumlichen Erhaltensneigung des Rohmaterialaufkommens zwischen Nr. 5 und Nr. 7. Es sei ausdrücklich betont, dass diese Resultate nicht der Methodenschwäche, sondern der ungenügenden Anzahl von Sondagen geschuldet sind. Der grundsätzliche Trend an dieser Stelle, das weitgehende Aussetzen eines abbauwürdigen Flözes, wurde trotz dieser Problematik gut erfasst und ist entgegen dem ersten Eindruck ein Argument *für* die Güte der Interpolation.

Trotz aller Problematik zeigt die Interpolation, dass zwischen *Schachtverteilung und möglicher Ausbeute* eine enge Beziehung bestand. Die hohen Schachtdichten im Bergwerksinneren werden so als das Bemühen verständlich, den Abbau dort zu intensivieren, wo reiche Vorkommen liegen. Genau entgegengesetzt verhält es sich am Rand des Bergwerks. Aus den Messwerten in den Sondagen Nr. 6 und Nr. 7 und den beiden hypothetischen Datenpunkten ergibt sich der Verlauf der südlichen Flözgrenze. Diese Grenze ist aufs engste mit dem Aussetzen der Schächte gekoppelt. Die Folgerung aus diesem Befund scheint zunächst trivial. Dort wo Hornstein in erreichbaren Tiefen kaum oder gar nicht mehr auftrat, wurde auch kein Abbau mehr betrieben.

Das zunächst unerklärliche Aussetzen des Schachtbaus in der Umgebung von Sondage Nr. 7, wo weiter westlich und östlich noch zahlreiche Schächte angelegt wurden, ist mit dem Abtauchen des Flözes unter die technisch möglichen Maximaltiefen des Schachtbaus zu erklären.

Weiter westlich, in der Umgebung der Sondagen Nr. 5 und Nr. 9 war auf gleicher Höhe noch ziemlich viel Hornstein anzutreffen. Aber auch hier setzte der Abbau schließlich aus, wenn die Ausbeute knapp wurde. Die Verlagerung des Abbaus erfolgte also in diesem Bereich der Grabungsfläche von Nord nach Süd, ganz wie es oben schon aus der Anordnung der Schachtgruppen erschlossen wurde (vgl. o. 2.1.6. Abb. 2.38). Die leichte Unschärfe bei der Beziehung zwischen Flözgrenze und Abbaugrenze ist wieder einmal Resultat der zu geringen Sondagenzahl. Weitere Sondagen im Bereich westlich und nördlich von Nr. 6 und Nr. 7 hätten vermutlich zu einer noch besseren Übereinstimmung zwischen interpolierter Ausbeute und Abbaugrenze geführt.

Die Kopplung zwischen dem *Aussetzen des Schachtbaus* und der Flözgrenze mag auf den ersten Blick banal erscheinen. Bei näherer Betrachtung wird jedoch klar, dass man bisher nur plausible Vermutungen anstellte, während man jetzt über eine objektive Aussage verfügt, die zudem noch die Quantifizierung der Abbauwürdigkeit erlaubt. Verbindet man die Rohmaterialmengen aus der Sondage Nr. 6 ($7,16 \text{ kg/m}^2$) und der Rohmaterialsondage der Altgrabung ($21,9 \text{ kg/m}^3$ entsprechen ca. $13,1 \text{ kg/m}^2$ bei $0,6 \text{ m}$ Flözmächtigkeit), ergibt sich sogar eine quantifizierbare Untergrenze für die Abbauwürdigkeit des Flözes.

Die neolithischen Bergleute kannten also auch eine "*Kostengrenze*", bei der sie den Abbau als nicht mehr lohnend betrachteten. Diese Grenze lag bei etwa $10,6 \text{ kg}$ ($(7,16 \text{ kg/m}^2 \times 1,04 \text{ m}^2 + 13,14 \text{ kg/m}^2 \times 1,04 \text{ m}^2) : 2 = 10,556 \text{ kg}$). Das entspricht ca. $0,9 \text{ kg}$ für einen Bergmann pro Tag und damit weniger als ein Viertel des durchschnittlichen Ertrages pro Mann-Tag von ca. 4 kg (s. u.; $10,556 \text{ kg} / 12 = 0,88 \text{ kg}$).

Die im Abschnitt zur Schachtverteilung vermutete *Tradition bei der Bergbauorganisation* wird durch diese Ergebnisse ebenfalls unterstützt. Der Zusammenhang zwischen dem lokalen Weiterführen bzw. Abbrechen des Abbaus belegt indirekt, dass die Schächte, die mittelbar und unmittelbar am Rande des Bergwerks lagen, von Angehörigen derselben Gruppen betrieben wurden. Denn nur so ist zu erklären, wieso nach dem Aussetzen des Flözes auch der Abbau endgültig aufgegeben wurde. Wären immer neue Personen tätig gewesen, so sollten zahlreiche Schächte als Fehlversuche noch weit im rohmaterialfreien Bereich auftreten, da diese Personen ja keine Kenntnis von der im Untergrund vorhandenen Grenze besessen hätten. Das aufgrund der regelmäßigen Thiessenpolygone entworfene Modell von "Traditionsflächen" (s. o. 2.1.6. Abb. 2.38), in denen eine bestimmte Gruppe immer wieder aktiv wurde, um neue Schachtgruppen nach den gleichen Regeln anzulegen, wird durch diesen Befund zusätzlich gestützt. Das ist besonders bemerkenswert, da die tesselierte Schachtverteilung und die interpolierte Flözhöflichkeit methodisch wie datentechnisch voneinander unabhängige Auswertungsschritte sind.

Die Unterstützung des oben entwickelten Modells der "Traditionsflächen" ist also ein gleichgerichtetes Ergebnis von besonderer Bedeutung.

Auf weiterführende, detaillierte Auswertungen zur Ausbeute der einzelnen Schachtgruppen wird verzichtet, da die Interpolation der Flözstruktur keine ausreichende Detailgenauigkeit für diesen Schritt besitzt.

Aus dem ermittelten Hornsteinvorkommen "unter" einer Fläche lässt sich aber zumindest die *durchschnittliche Schachtausbeute* schätzen. Wie bemerkt sind auch die Schächte überwiegend als zweidimensionale Objekte mit einer flächigen Ausdehnung dokumentiert. Auf unterschiedlichen Plana in der Kiesgrube wurden mittels GIS die Flächen von 201 Schächten berechnet. Einbezogen wurden nur Objekte, bei denen die Plana den Schachthals erfasst hatten und nicht bereits ein Teil der Weitung angeschnitten worden war. Die dabei ermittelte durchschnittliche Planumsfläche eines Schachthalses beträgt $0,73 \text{ m}^2$. Wenn die Schächte das Flöz erreichten, erweiterte man sie zu den Seiten hin. Dementsprechend wird auch die Fläche größer, auf der das Flöz von oben nach unten durchstoßen und abgebaut wurde.

Flächenzunahme zwischen Schachthals und Weitung				
Schacht-Nr.	Fläche Schachthals in m^2	Fläche Weitung in m^2	Zunahme in m^2	Zunahme in %
9	0.55	0.77	0.22	40.00
36	0.48	0.76	0.28	58.33
37	0.37	0.81	0.44	118.92
58	0.58	1.36	0.78	134.48
90	0.51	1.66	1.15	225.49
91	0.54	1.05	0.51	94.44
93	0.62	1.67	1.05	169.35
96	1.00	2.03	1.03	103.00
166	0.58	1.13	0.55	94.83
170	0.82	1.23	0.41	50.00
172	0.48	2.79	2.31	481.25
Durchschnitt	0.59	1.39	0.79	142.74

Tab. 2.6: Abensberg-Arnhofen. Flächenzunahme zwischen den Plana von Schachthälsen und den Plana von Weitungen im Bereich der Kiesgrube.

Um den allgemeinen Bezug zwischen der Fläche von *Schachthälsen und Schachtweitungen* auf Flöz-niveau zu erhalten, muss man die relative Flächenzunahme zwischen beiden Niveaus ermitteln (**Tab. 2.6**).

Von elf Schächten konnte bei der Ausgrabung neben ihrer Schachthalsfläche auch das Areal ihrer Weitung bestimmt werden. Zwar sind die Schächte, von denen diese Werte stammen, im Halsbereich unterdurchschnittlich groß ($0,59 \text{ m}^2$), da hier aber das relative und nicht das absolute Verhältnis zwischen Weitung und Schachthals interessiert, kann man auch mit ihnen weiterarbeiten. Es gilt, die durchschnittliche prozentuale Zunahme der Fläche zu ermitteln. Bei den Schächten waren auch solche, deren Wände vermutlich beim Verfüllen noch ausgebrochen sind, was ihre Planumsfläche vergrößerte. Bezieht man sie dennoch mit ein, erhält man einen konservativen Schätzwert für die Flächenzunahme der Weitung gegenüber dem Schachthals, und somit wiederum eine zurückhaltende Schätzung für die Ausbeute des Bergbaus insgesamt.

Als Resultat aus diesem Vorgehen ergab sich eine durchschnittliche Flächenzunahme der Weitung auf 142 % der Planumsfläche im Halsbereich. Ein durchschnittlicher Schacht mit $0,73 \text{ m}^2$ Planumsfläche auf dem Niveau des Schachthalses sollte demnach im Bereich des Flözes eine Weitung von $1,04 \text{ m}^2$ Fläche besitzen. Mit einem Schacht konnte man also das Flöz auf etwas mehr als einem Quadratmeter abbauen – konservativ geschätzt.

Die *Schachtdichte pro Ar* variiert im Bereich der Kiesgrube zwischen 11 am Bergwerksrand und über 30 in den weiter innen gelegenen Arealen. Aber auch im nördlichen Teil der Kiesgrube schwanken die Zahlen zwischen 24 und 31. Im Bereich der Haldengrabung kommen sogar bis zu 33 Schächte auf einen Ar. Eine hochgerechnete Schachtdichte von 30 pro Ar ist daher eine vertretbare Größe für die folgende Überlegung. Für diesen Arbeitsschritt werden alle erwähnten Werte als repräsentativ bzw. verallgemeinerbar angesehen.

Eine *Modellrechnung der Bergbauausbeute* sieht demnach so aus: Auf einem Ar wurde die Lagerstätte durch die Weitungen von 30 Schächte auf einer Fläche von $31,2 \text{ m}^2$ abgebaut und damit entsprechend zu 31,2 % ausgebeutet. Für ein Ar ergeben sich wegen des Gewichts brauchbaren Rohmaterials pro Quadratmeter (46 kg/ m^2) geschätzte 4600 kg verarbeitungswürdiger Hornstein. Davon wären also pro Ar 1435 kg gefördert worden (31,2 % von 4600 kg). Für das Hektar sind entsprechend dem Faktor 100 dann 460 Tonnen einstmals vorhandener brauchbarer Hornstein anzunehmen bzw. ein Abbau von 143,5 Tonnen brauchbarem Hornstein. Bei einer konservativ geschätzten Gesamtfläche für das Bergwerk von Abensberg-Arnhofen von 40 ha (zur Fläche s. o. 1.4. Abb. 1.5.) ergäbe dies insgesamt 5740 Tonnen an abgebautem brauchbarem Hornstein (40 mal 143,5 t). Diese Menge ist auf eine Nutzungsdauer von mindestens 1100 Jahren zu verteilen. Wahrscheinlicher ist jedoch ein Zeitraum von ca. 3000 Jahren.

Gleichbleibende Förderquoten vorausgesetzt ergibt dies für die kurze Laufzeitvariante von 1100 Jahren die Fördermengen von ca. 5200 kg brauchbaren Hornsteins pro Jahr. Bei der langen Laufzeit ergeben sich nur etwa 1900 kg per annum. Legt man stattdessen die, zugegebenermaßen spekulative, Schätzung zur Verteilung der Abbauintensität auf die einzelnen Zeitphasen zugrunde (s. o. 2.1.2.), ergibt sich ein etwas anderes Bild.

Da die *Bedeutung des Arnhoferer Hornsteins* für das Alt- und das Mittelneolithikum genauer bestimmt werden kann (s. u. 4.2. und 4.3.), wird auch jeweils eine Schätzung für diese Zeiträume abgegeben. Die größte Unwägbarkeit besteht bei all dem aber nicht in dem einen oder anderen Zahlenwert. Die wichtigste Voraussetzung ist, dass der Abbau auch schon in diesen Zeiten auf die gleiche Art erfolgte, wie in den hier untersuchten, wahrscheinlich frühjungneolithischen Arealen. Zumindest für das Mittelneolithikum kann man dies jedoch aufgrund zweier Argumente annehmen. Zum einen ist der zeitliche Abstand zum Jungneolithikum gering. Zum anderen zeigt das Bergwerk von Krumlovsky Lés, bei dem bergbautechnisch ganz ähnliche Anforderungen zu meistern waren, dass nur einige hundert Kilometer östlich von Arnhofen ein mittelneolithischer Bergbau auf die gleiche Weise betrieben wurde, wie im frühjungneolithischen Arnhofen. Auch im Krumlovsky Lés wurden kreisrunde Schächte bis über 8 m senkrecht durch sandige Schichten getrieben (OLIVA 2006).

Für die *Bandkeramik* sind nach dem in 2.1.2. entwickelten Ansatz in etwa 400 Jahren (5350 v. Chr. bis 4950 v. Chr.) zwei Einundzwanzigstel der Gesamtfördermenge zu veranschlagen. Von den insgesamt 5740 t gefördertem Hornstein entfallen demnach 546,7 t auf die LBK, was 1,37 t (1366,7 kg) pro Jahr entspricht. Einer Schätzung von Andreas Zimmermann zufolge lag der Bedarf eines bandkeramischen Gehöfts bei 1,3 kg Silex pro Jahr (ders. 1995, 82). Danach ergibt sich für die Zeit um 5000 v. Chr. ein maximales Versorgungspotential von etwa 1050 Haushalte (1051,3). Geht man aber von einer Vorauswahl bei der Förderung aus, bei der Plattenhornstein (30,2 % des brauchbaren Gewichts; s. o. Tab. 2.5) vollständig, der Knollenhornstein aber nur jeweils in der gleichen Anteilsmenge gefördert wurde (Verhältnis Platte zu Knolle 50 zu 50; also dann 60,44 % der möglichen Förderung), so ergeben sich 330,4 Tonnen bandkeramische Gesamtförderung. Daraus resultiert nur eine Fördermenge von 826 kg pro Jahr, was einem Versorgungspotential von 635 Haushalten entspricht. Bei 47,8 kg pro Schacht und einer Vorauswahl von 60,44 % der möglichen Förderung, also 28,89 kg pro Schacht, ergeben sich für die Bandkeramik ganze 29 Schächte pro Jahr. Bei einem derartigen Umfang des Bergbaus sind komplexe Planungsmuster nicht notwendig. Es ist daher unwahrscheinlich, dass schon zu dieser Zeit Muster zur Anwendung kamen, wie sie hier für die späteren Phasen angenommen werden.

Die Schätzung für das *Mittelneolithikum* sieht folgendermaßen aus. Von den 5740 t entfielen etwa zwei Drittel oder 3830 t auf die zwei Jahrhunderte zwischen 4950 v. Chr. und 4750 v. Chr. und damit etwa 19,13 t auf ein Jahr ($3830 \text{ t} : 200 = 19,13 \text{ t}$). Im Mittelneolithikum wurde jedoch fast ausschließlich die plattige Variante vertauscht und das wären dann nur noch 30,2 % dieser Menge, also 1156,66 t insgesamt bzw. 5778 kg jährlich. Hält man Zimmermanns Schätzung auch im Mittelneolithikum für repräsentativ, ergibt sich ein Versorgungspotential von 4445 Haushalten pro Jahr ($5778 \text{ kg} / 1,3 \text{ kg}$). Nimmt man aber an, Plattenhornstein sei etwa 40 % besser verwertbar als Knollenhornstein (s. u. 3.2.2.), ist stattdessen von einem Bedarf von nur 0,78 kg und folglich 7408 Haushalten auszugehen. Festzuhalten bleibt, nach diesem Modell konnte der Arnhofener Bergbau um 4800 v. Chr. zwischen etwa 4400 und etwa 7400 Haushalte versorgen (Mittelwert 5900).

Setzt man eine bandkeramische Siedlungsgruppe á 12 Bauernhöfe mit einem *mittelneolithischen Dorf* gleich, lieferte Arnhofen bei optimaler Verwertung pro Jahr genug für etwa 490 Siedlungsgruppen bzw. Dörfer ($5900 / 12$). Wie weiter unten noch gezeigt werden wird, wurde der Hornstein im Mittelneolithikum wahrscheinlich von einzelnen Verbrauchern abgeholt. Bei einer Trägerleistung von ca. 20 kg wären im Mittelneolithikum etwa 300 Personen pro Jahr nötig gewesen, um eine Verteilung des Hornsteins zu gewährleisten.

Vergleiche mit anderen Bergwerken zeigen, dass diese zunächst riesig erscheinenden Zahlen eine "echte" Größenordnung neolithischen Wirtschaftens sind. Bei einer Gegenüberstellung des *Rijckholt-Feuersteins* und der Besiedlungsdichte in der Bandkeramik ergab sich, dass ca. 1800 Haushalte mit diesem Feuerstein versorgt wurden (ZIMMERMANN et al. 2004, 84 Tab. 6). Die Kapazitäten neolithischer Silexgewinnung und -weitergabe zur Versorgung neolithischer Haushalte bewegten sich also in einer Größenordnung, die mehrere tausend Wirtschaftseinheiten umfassen konnte. Verknüpft man diese Größenordnung jedoch mit den dazu nötigen Kontakten und Personenzahl, ergibt sich das geradezu beschauliche Bild einer bäuerlichen Nebentätigkeit.

Auch der Vergleich mit der Ausbeute im jungneolithischen Bergwerk *Jablins* in Nordostfrankreich zeigt (BOSTYN/LANCHON 1992, 135 Fig. 125 und bes. 184 Fig. 182; vgl. o. 2.1.8.), dass die Arnhofener Fördermengen von mehreren Tonnen Hornstein pro Jahr durchaus innerhalb üblicher neolithischer Größenordnungen liegen. Dort förderte man mit einem Schacht bis zu 10 Tonnen verwendbaren Rohmaterials! Immerhin ein Drittel aller untersuchten Schächte ergab dabei Fördermengen von 2 bis 10 Tonnen pro Schacht. Die anderen zwei Drittel lagen bei nur etwa 300 kg pro Schacht.

Geht man von etwa 1 Tonne pro Schacht aus (vgl. a. a. O., 184 Fig. 182), ergibt sich bei einer konservativen Laufzeitschätzung von etwa 1200 Jahren zwischen 4200 v. Chr. und 3000 v. Chr. und insgesamt ca. 4000 Schächten (3,67 Schächte pro Jahr) eine durchschnittliche Fördermenge von etwa 3,7 Tonnen pro Jahr. Diese Menge ist durchaus mit den maximalen Fördermengen von knapp 5,8 t/a in Arnhofen zu vergleichen.

Mit diesen Größenordnungen kann man jetzt dem *Wert des Hornsteins* nachspüren. Dafür ist auf die Arbeitszeitschätzung für einen Schacht (s. o. 2.1.7.) und die durchschnittliche Ausbeute pro Quadratmeter Flöz zurückzugreifen. Ein Schacht von etwa 5 m Tiefe konnte in nur 4 Tagen gegraben werden. Dafür bedurfte es mindestens dreier Bergleute, was insgesamt 12 Mann-Tage bedeutet. Ein Schacht durchschnitt das Flöz auf etwa $1,04 \text{ m}^2$ und erbrachte im Schnitt 47,8 kg an gutem Rohmaterial ($1,04 \text{ m}^2 * 45.957 \text{ kg/m}^2 = 47,805 \text{ kg}$; gerundet also 48 kg brauchbarer Hornstein in Tab. 2.5, Zeile "Durchschnitt bei variabler Lagerstätte"). Für die Berechnung des Anteils an gutem Plattenhornstein ist nochmals auf Tab. 2.5 zurück zugreifen. Der Anteil wird aus der Zeile "Durchschnitt" bei "variabler Mächtigkeit" abgeleitet: Dort macht der Anteil "brauchbarer Platten" (13,3 kg) am Gesamtgewicht aller "brauchbaren Stücke" ca. 28,9 % aus (46 kg). Entsprechend ergibt ein Schacht im Durchschnitt 13,82 kg guten Plattenhornstein ($0,289 * 1,04 \text{ m}^2 * 45.957 \text{ kg/m}^2 = 47,805 \text{ kg}$). Auf den Arbeitstag eines Bergmannes entfiel nach der Arbeitszeitschätzung ein Zwölftel der durchschnittlichen Fördermenge eines Schachtes, was einer Hornsteinmenge von etwa 4 kg ($47,805 \text{ kg} / 12 = 3,98 \text{ kg}$) bzw. 1,15 kg Plattenhornstein entsprach ($13,82 \text{ kg} / 12 = 1,15 \text{ kg}$). Ein neolithischer Bergmann konnte mit einer eintägigen Arbeitsleistung auf dem Arnhofener Bergwerk den Bedarf eines Gehöfts (1,3 kg/a) über mehr als 3 Jahre decken. Bezogen auf den Plattenhornstein erbrachten zwei Tage in Arnhofen den dreifachen Jahresbedarf eines Gehöfts (bei 0,78 kg/a)!

Auf dieser Grundlage kann man anhand des Gewichts den *Wert einer modifizierten Klinge* aus Plattenhornstein quasi "ab Förderung" schätzen (bei 4 g Durchschnittsgewicht in Mitterfecking während des SOB; s. u. 3.2.5. Tab. 3.50). Den Arbeitsaufwand für das Schlagwerkzeug kann man vernachlässigen, denn seine Abnutzung bei einem einzigen Schlag war minimal. Die Arbeitszeit für die Herstellung einer Klinge umfasst ebenfalls nur wenige Sekunden und fällt nicht ins Gewicht. Der restliche Aufwand für eine Klinge beträgt etwa das Zweihundertneunzigstel eines Arbeitstages. Er ist demnach kaum der Rede Wert.

Es verhält sich mit dem Wert von Feuersteinartefakten genauso, wie schon Zimmermann vermutete: *Der ökonomische Wert einer Klinge ist "eine leicht entbehrliche Kleinigkeit für den Gebenden, [und] eine begehrte Kleinigkeit für den Nehmenden"* (ders. 1995, 107).

Zumindest im nordwestlichen Niederbayern dürfte dieses Wertverhältnis auch auf alle anderen Hornsteine verallgemeinert werden. Man wird wohl kaum einen Rohstoff genutzt haben, wenn dafür mehr Arbeitszeit nötig war, als hier skizziert. Erst in größerer Entfernung zu den Vorkommen dürfte in Siedlungslandschaften ohne Rohstoff, etwa im Gäuboden oder dem Isartal, vermutlich der Wert des Materials angestiegen sein. Hier kam auch noch die notwendige Reisezeit zu den Vorkommen hinzu (vgl. u. 4.3.3.2.).

Man kann sogar eine „Kostenschwelle“ für den Abbau angeben. Verbindet man den erwünschten Mindestertrag von 0,9 kg Hornstein pro Mann-Tag (0,880 kg) mit der Annahme, Hornstein sei im Mittelneolithikum eine Ware – ein extra für den Tausch hergestelltes Produkt – gewesen, ergibt sich folgende Wertrelation. Man gab den Bergbau auf, wenn der Ertrag unter ein Viertel der normalen Ausbeute von 3,98 kg für einen Mann-Tag sank. Relativ ausgedrückt lag diese Kostenschwelle bei 22,1 % des erwarteten Ertrages ($10,556\text{kg} / 47,805\text{kg} = 0,2208$; zum minimalen und durchschnittlichen Ertrag pro Schacht s. o.).

Für diese Größe gibt es keine direkten Vergleichswerte. Nur zum Verhältnis zwischen abgebauten und brauchbaren Volumina findet sich ein Vergleichswert. Im französischen Jablines wurde untersucht, wieviel Prozent der Silex von dem Volumen ausmachte, das beim Tiefbau bewegt wurde (BOSTYN/LANCHON 1992, 97ff.; vgl. o. 2.1.8.). Eines der beiden in Jablines abgebauten Flöze bestand allerdings aus einer durchgehenden, ca. 0,1 m bis 0,15 m mächtigen Silexbank (a. a. O., 35ff.). Das Flözvolumen dort war also ungleich gehaltvoller als das in Arnhofen. Die Kostenschwelle in Jablines liegt bei 2 % des bewegten Volumens (a. a. O., 101 Fig. 83 D). Die beobachteten Schächte erbrachten also mindestens ein Silexfördervolumen von einem Fünftel des bewegten Sediments.

In Arnhofen ergibt sich als durchschnittlich erschlossenes Flözvolumen ein Wert von $0,612\text{ m}^3$ pro Schacht ($0,6\text{ m} * 1,02\text{ m}^2 = 0,612\text{ m}^3$). Bei einem 1 m durchmessenden und 4 m tiefen Schacht, also einem Schachtvolumen von $3,14\text{ m}^3$ ($0,5\text{ m}^2 * 4\text{ m} * \pi = 3,14\text{ m}^3$), entspricht das durchschnittlich erschlossene Flözvolumen von $0,612\text{ m}^3$ einem Anteil von 19,48 %. Bei einem 8 m tiefen Schacht halbiert sich dieser Wert auf 9,74 %. Da die Schächte am Südrand des Bergwerkes in der Regel bis in Tiefen von knapp über 8 m vorangetrieben wurden, ist ein Wert von ca. 10 % eine gute Annäherung. Bedenkt man nun noch, dass von dem erschlossenen Flözvolumen nur ein Bruchteil aus Hornstein bestand, relativiert sich der Unterschied zwischen den etwa 10 % in Arnhofen und den etwa 2 % in Jablines. Die Dichte des Hornsteins pro Volumeneinheit im Flöz wurde nicht untersucht, aber wie in Abb. 2.51 erkennbar handelte es sich nur bei einem Bruchteil des Flözvolumens um Hornstein. Vermutlich sind die Arnhofener Werte denen von Jablines also wesentlich ähnlicher als die bisherigen Schätzungen vermuten lassen.

Neben solchen Erwägungen eignen sich die Hochrechnungen zur Gesamtfördermenge auch, um zur Klärung der Frage nach einer *Vollzeitspezialisierung* im mittelneolithischen Bergbau beizutragen.

Dabei werden absichtlich sehr hohe Schätzwerte für die zugrunde gelegten Zahlen gewählt. Wenn sich dann trotzdem keine Verhältnisse ergeben, die eine Vollzeittätigkeit erfordern, kann man diese guten Gewissens ausschließen. Es sei eine Bergwerksfläche von 40 ha bei 3000 Schächten pro Hektar angenommen, was insgesamt 120 000 Schächten entspricht. Davon entfielen nach dem im Abschnitt 2.1.3. vorgeschlagenen Schlüssel ca. 80 000 auf das frühe Mittelneolithikum (4950 v. Chr. bis 4750 v. Chr.), was 400 pro Jahr entspricht. Bei der Arbeitsleistung einer Dreier-Arbeitsgruppe, die drei Schächte in zwei Wochen anlegen konnte, wären insgesamt 6 solcher Gruppen nötig gewesen, um den gesamten (!) Abbau zu tätigen. Bei drei Schächten in zwei Wochen ergeben sich insgesamt 78 Schächte pro Gruppe und Jahr. Wenn es sich dabei um Vollzeitspezialisten gehandelt hätte wären also ganze 18 Personen im Bergbau aktiv gewesen.

Der Tauschwert der Tagesausbeute an Hornstein (1,15 kg Platte) in einer der Anliegersiedlungen müsste im Fall von Vollzeitbergleuten etwa zwei Tagesrationen betragen haben – auch die Angehörigen der Bergleute (Alte und Kinder) hätten ja versorgt werden müssen. Selbst dann wäre der Wert einer Klinge aber immer noch sehr klein gewesen: er hätte dem einhundertfünfundvierzigsten Teil einer Tagesration entsprochen.

Wie weiter unten noch ausführlicher diskutiert (s. u. 4.1.3.), ist es jedoch höchst unwahrscheinlich, dass eine lokale Gruppe von etwa 20 Personen eine Sonderrolle in der sonst als Subsistenzbauern (Subsistenz bzw. ‘domestic mode of production’ nach SAHLINS 1974, 41ff.) lebenden mittelneolithischen Bevölkerung spielen konnte. Selbst wenn der Abbau von vollzeitspezialisierten Bergleuten betrieben worden wäre, hätte diese Gruppierung keinen größeren Einfluss auf die sozio-ökonomische Organisation der neolithischen Gesellschaft ausüben können. Im Gegenteil: der Druck, den die Gesellschaft auf eine solche, nicht zu ihren sonstigen wirtschaftlichen Normen passende Organisation ausgeübt hätte, dürfte ein derartiges Phänomen binnen spätestens einer Generation wieder zum Verschwinden gebracht haben.

Die Verbreitung eines so “billigen“ Materials wie des Arnhofener Hornsteins durch vollzeitspezialisierte Händler konnte aufgrund der geringen Wertgröße des Hornsteins überhaupt nie profitabel gewesen sein. Selbst ein in Vollzeitspezialisierung betriebener Abbau schlosse wegen der geringen Wertschöpfung eine Spezialisierung bei der Weitergabe – also die Existenz von Vollzeithändlern – aus.

Nun ist davon auszugehen, dass das alt- und mittelneolithische *bäuerliche Wirtschaften* im Winterhalbjahr eine größere Menge an Freizeit beinhaltete.

Die Hornsteinabnehmer hätten also über genug Zeit verfügt, um selbst in einigen Tagen zum Bergwerk und zurück zu wandern. Eine hohe Mobilität von Personen ist nach neuesten Studien zumindest für die Bandkeramik nachgewiesen (KNIPPER/PRICE 2006). Diese Mobilität könnte auch im Mittelneolithikum noch fortbestanden haben. Zu Rohstoffquellen zu wandern, die mehrere Tage entfernt lagen, wäre für die Hornsteinabnehmer ein normales Verhalten gewesen. Ein Händler hätte die Kosten des Transports, die vermutlich die Hälfte der Gesamtkosten des Hornsteins ausmachten (s. u. 4.3.3.2.), auf die Abnehmer umwälzen müssen. Da diese aber über genug Zeit verfügten, um selbst zum Bergwerk zu gehen, wäre der Versuch einen vollzeitspezialisierten Handel zu etablieren, im Ansatz gescheitert!

Für den *mittelneolithischen Bergbau* ist demnach folgende Variante viel plausibler als der Vollzeitbergbau. Wahrscheinlich wurde jeder der mindestens 30 mittelneolithischen Haushalte aus der unmittelbaren Nachbarschaft des Bergwerkes aktiv. Dabei sind 30 Haushalte angesichts von Siedlungen bei Pullach, Unterteuerting-Nord und -Süd, Unterwendling, Mitter- und Oberfecking, Schoissenkager, Buch und Herrnwahlthann noch niedrig gegriffen. Wurde jeder Haushalt einmal im Jahr tätig, entfielen ganze 13 Schächte auf eine Arbeitsgruppe ($400 : 30 = 13,3$). Dieses Arbeitspensum von nur neun Wochen (3 pro 2 Wochen) ließ sich leicht im Winterhalbjahr erledigen. Nach den neuesten Schätzungen zum alt- bzw. mittelneolithischen Arbeitspensum in der Landwirtschaft wären Bergbauaktivitäten selbst zu anderen Jahreszeiten möglich gewesen (frdl. mdl. Mitt. Tim Kerig). Wenn man nun noch an die etwa 300 nötigen Träger denkt, die im Mittelneolithikum pro Jahr die Region aufsuchen mussten, dann kämen je 10 Kontakte auf einen Haushalt. Selbst in der Hochphase von Arnhofen hätten alle Kontakte auf ganz persönlicher Ebene stattfinden können. Für den einzelnen Haushalt mag sich daraus eine höchst vorteilhafte ökonomische Situation ergeben haben, ein Verzicht auf die eigene Bauertätigkeit war damit jedoch nicht möglich.

Eine andere Variante orientiert sich an einer von Weissmüller diskutierten Organisationsform (ders. 1996, 24). Dabei bestand eine Arbeitsgruppe nicht alleine aus direkten Bergwerksanliegern. Stattdessen wären einige Abnehmer aus der weiteren Umgebung zum Bergwerk gereist, und hätten dort einen fachkundigen Einheimischen als Leiter gewonnen. In diesem Fall wären immer genug Arbeitskräfte vorhanden gewesen. Da der Wissenstransfer von Spezialwissen in traditionellen Gesellschaften wie der mittelneolithischen wohl streng reglementiert war, ist eine freiere Organisationsform in dieser Art aber wenig wahrscheinlich (vgl. u. 4.3.3.1.2.).

Um Probleme beim Wissenstransfer zu umgehen, hätte es sich für die Abnehmer angeboten, verwandtschaftliche Beziehungen mit einer Familie aus der Bergwerks Umgebung einzugehen, um immer geneigte Ansprechpartner vor Ort zu haben. Dadurch hätte man sich beim Bergbau auf einen verwandtschaftlich begründeten Hilfsanspruch berufen können. Für diese Personen wäre die Versorgung dann so problemlos gewesen, dass die Anteilshöhe in ihren Siedlungen der in der Bergwerks Umgebung entsprechen sollte. Derartige Verbindungen wären besonders für die niederbayerischen Abnehmer attraktiv gewesen.

Die wirtschaftshistorische Einschätzung belegt eindeutig, dass selbst in der *Hochphase des Bergwerks* alle Quantitäten gegen die Existenz von Vollzeitbergleuten in Arnhofen und Vollzeithornsteinhändlern in der Region sprechen. Da weder zuvor noch danach, also während der Bandkeramik bzw. des Jung- und Spätneolithikums, mehr pro Jahr gefördert wurde, kann man sagen: Wahrscheinlich gab es niemals eine Vollzeitspezialisierung bzw. Professionalisierung in Verbindung mit der Gewinnung und der Weitergabe von Arnhofener Hornstein.

An dieser Stelle sei noch einmal auf die Gegenposition eingegangen. Wer trotzdem Vollzeitspezialisierung annimmt, der behauptet, es hätte eine gesellschaftliche Ausnahmesituationen vorgelegen, bei denen sich Kleinstgruppen aus wenigen Dutzend Personen völlig gegen das sonst übliche Wirtschaften in der Gesellschaft stellten und damit erfolgreich waren! Eine solche Sicht der Dinge muss, wenn sie wissenschaftlich ernst genommen werden will, dann archäologisch und sozialhistorisch schlüssig erklären, wie ein solcher Sonderfall möglich gewesen sein soll. Sie muss außerdem seine historische Entstehung und Entwicklung schlüssig mit dem bisherigen Kenntnisstand vereinen.

Die Vereinbarkeit der bisherigen Schätzungen mit den hier angeführten Zahlen ist danach zu beurteilen, ob diese Schätzungen mit den im Weiteren noch vorgelegten Zahlen in Einklang gebracht werden könnten. Wenn man die *bisherigen Annahmen zur Ergiebigkeit* der Lagerstätte hochrechnet (s. o. Tab. 2.5, Zeile "1988"), ergibt sich bei heutigem Kenntnisstand zu Laufzeit und Ausdehnung sowie gleichzeitig minimal angesetztter Schachtdichte von 15 Schächten pro Ar folgendes Ergebnis. Da das Flöz meist nur einige Dezimeter mächtig ist, müssen zunächst die für einen Kubikmeter gemachten Angaben entsprechend verringert werden. Bei einer angenommenen Flözmächtigkeit von 0,5 m kommt man auf 2,68 kg Platten- bzw. 8,38 kg Knollenhornstein pro Quadratmeter. Bei 1,04 m² ausgebeuteten Flöz pro Schacht sind das 11,06 kg guten Hornsteins, davon knapp 2,8 kg Platte.

Das macht pro Ar 165,9 kg Hornstein (11,06 kg mal 15) bzw. 41,8 kg Platte, entsprechend pro Hektar 16,59 t und 4,18 t. Bei 40 ha Fläche ergibt das insgesamt 663,6 t. Nimmt man davon zwei Drittel für das Mittelneolithikum erhält man 442,4 t Hornstein für 200 Jahre, pro Jahr also 2,212 t bzw. ganze 538,8 kg Plattenhornstein. Bei 0,78 kg pro Haushalt hätte Arnhofen selbst in seiner Hochphase insgesamt nur 691 Haushalte versorgen können. Bei der heute bekannten mittelneolithischen Besiedlungsdichte (s. u. 4.3.4.) wäre nach diesen Schätzungen nicht einmal genug Hornstein vorhanden gewesen, um Niederbayern zu versorgen, geschweige denn Westböhmen und die anderen Verbraucherregionen!

Die Größenordnung der ursprünglichen Schätzung von Engelhardt und Binstener (dies. 1988, 26), die von 270 t guten Rohmaterials insgesamt und von nur 70 t Plattenhornstein während des gesamten Bergbaus ausgehen, ist logischerweise ebenso unhaltbar. Gleiches gilt für die von Riederer vorgeschlagene Minimax-Schätzung mit 91 t bzw. 202 t insgesamt und 22 t bzw. 24 t Plattenhornstein (ders. 1990, 14). Auch in der revidierten Fassung ist die Schätzung von Binstener mit einer Gesamtfördermenge von 219 t immer noch viel zu niedrig (ders. 2005, 89). Dass seine Förderschätzungen für Arnhofen in dieser Größenordnung grundsätzlich zu gering angesetzt sind, müsste eigentlich auch Binstener selbst aufgefallen sein. Nimmt er doch für das Bergwerk von Flintsbach-Hardt eine Gesamtfördermenge von immerhin 1205,6 t an (a.a.O.) – und diese Quelle war nie auch nur annähernd so bedeutsam wie Arnhofen! Wirtschaftshistorische Schätzungen zu gleichartigen benachbarten Phänomenen, die obendrein noch teilweise zeitgleich waren, sollten, zumal wenn sie vom gleichen Autor vorgenommen werden, ein kohärentes Bild zeigen und sich nicht selbst widersprechen.

Die alten wie die neuen Schätzungen von dieser Seite sind – wahrscheinlich aufgrund des Fokus auf dem Bergwerksoutput – nach heutigem Kenntnisstand mindestens um den Faktor 10 zu niedrig angesetzt.

Man darf über all diesen *Zahlen* nicht vergessen, dass es sich um Hypothesen und Modelle handelt, die von Fehleinschätzungen und unzutreffenden Repräsentativitätsannahmen betroffen sein können. Das Ziel solcher Überlegungen ist denn auch nicht die exakte Bestimmung der Größen aufs Kilogramm oder die Arbeitsstunde genau. Bei einem über 6000 Jahre alten wirtschaftshistorischen Phänomen kann aber selbst ein grobes Bild als gute Annäherung an die Prähistorie gelten. Dabei zeigt sich, dass man für plausibler Weise vertretbare Antwort alle nur irgendwie erschließbaren prähistorischen Größen quantifizieren muss.

Das Kapitel 4.3. wird belegen, dass die hier vermuteten Größenordnungen wegen ihrer Verträglichkeit mit den dortigen Resultaten ein durchaus plausibles wirtschaftshistorisches Modell darstellen. Da die dortigen wirtschaftsgeographischen Analysen auf ganz anderen Quellen und Methoden basieren, ist ihre Vereinbarkeit mit den hier vorgenommenen Schätzungen ein Beleg für die Qualität beider Ansätze.

In den Abschnitten 4.2.4. und 4.3.4. werden die hier vorgestellten *Modellrechnungen* zur Versorgungskapazität mit der Besiedlungsdichte des südlichen Mitteleuropa und den tatsächlich verbrauchten Mengen in Bezug gesetzt. Erst damit kann die wirtschaftliche Bedeutung Arnhofens vollständig erfasst werden. Der dort berechnete Umfang der Versorgung wird es auch erlauben, die Validität der Outputschätzungen zu prüfen. Damit kann man dann von der "Nachfrageseite" die Überlegungen zur Versorgungskapazität des neolithischen Hornsteinbergbaus überprüfen, die hier zunächst nur von der "Angebotsseite" her vorgetragen wurden.

Zunächst gilt es aber, die Verarbeitung des in Arnhofen geförderten Hornsteins genauer zu betrachten. Dafür werden im folgenden dritten Kapitel mehrere tausend Artefakte merkmalsanalytisch untersucht. Beim Bergbau gab es wie aufgezeigt nie eine Vollzeitspezialisierung. Vielleicht gab es sie ja bei der jungsteinzeitlichen Silexverarbeitung?