

Kapitel 2, Die Methode.⁸

2.1 Archäologisch statistische Methodik.

2.1.1 Grundbegriffe der Relativchronologie.

Für die Stellung der archäologischen Wissenschaft als Instrument der Geschichtsforschung ist die zeitliche Einordnung von archäologischen Funden von besonderer Bedeutung. Denn erst wenn der zeitliche Rahmen richtig abgesteckt ist, können die archäologischen Funde ihre Geschichte zu erzählen beginnen.

Neben der weitgehend naturwissenschaftlich dominierten Ermittlung der Absolutchronologie spielt dabei die der archäologischen Methodik eigene Relativchronologie eine große Rolle.

2.1.1.1 Vertikalstratigrafie.

Für die Erstellung einer Relativchronologie liefert die Stratigrafie die härtesten Argumente. Man erkannte schon relativ bald die vertikal-stratigrafische Abfolge. Unten liegende Schichten sind – im Allgemeinen – älter als darüber liegende. Bis vor kurzem wurden stratigrafische Zusammenhänge zunächst dokumentiert und dann auf dem Schreibtisch ausgewertet. Probleme bei der Auswertung konnten oft nicht mehr gelöst werden. Erst seit Entwicklung der Harris-Matrix⁹ kann man von einer systematischen Erfassung und Dokumentation der Schichtenfolgen sprechen. Verschiedene Computerprogramme ermöglichen es heute, gleich während der Grabung, alle Zusammenhänge einzugeben und rein rechnerisch zu überprüfen und eventuelle Probleme sofort aufzuzeigen und damit zu vermeiden.¹⁰ Aber nicht nur die Dokumentation hat sich dadurch geändert, sondern die Grabung selbst, die jetzt als Schichtengrabung durchgeführt wird.¹¹

Da jedoch diese stratigrafischen Zusammenhänge auf europäischen Fundplätzen nicht immer so gut beobachtbar sind wie an den Tell-Siedlungen mit ihren oft mehr als 10 m hohen Schichtenablagerungen, wurden schon sehr früh andere Methoden entwickelt, die ebenfalls zu einer Relativchronologie beitragen können.

2.1.1.2 Die Typologische Methode.

Der erste, der diese Methode anwandte, war Christian Thomsen,¹² der die Relikte urgeschichtlicher Zeiten vor allem nach dem Material in Stein, Kupfer und Eisen unterschied und danach auch die einzelnen Abschnitte – eben in dieser zeitlichen Reihenfolge – benannte. Ganz klar als Methode wurde diese Vorgangsweise von Oscar Montelius in seinem grundlegenden und auch heute immer noch gültigen Werk „Die Methode“ formuliert.¹³

Sein Ausgangspunkt in der Entwicklung dieser Methode war die typologische Reihe. Ein bestimmter Gegenstand (= funktioneller Typ), zum Beispiel die Kupfer- und Bronzedolche Italiens, wurden herausgegriffen und alle Vertreter gesammelt. Dann versuchte Montelius, im Sinne einer sich in den Objekten niederschlagenden „Kultur-Evolution“ die verschiedenen Exemplare dieses Gegenstands in eine Reihe zu bringen, die ihrer Entwicklung im Laufe der Zeit entsprechen könnte. Anfangs war nicht klar, in welcher Richtung diese Reihe läuft. Denn die vereinfachende Auffassung, dass die Entwicklung immer vom Einfachen zum Komplexen läuft, war bald durch verschiedene Gegenbeispiele ad absurdum geführt worden.

Eine Lösung bot das so genannte technologische Ornament, das auch als typologisches Rudiment bezeichnet wird. Montelius verstand darunter ein Gestaltelement, das jede Funktion verloren hatte, dessen Ableitung jedoch aus Vorstufen, in denen es noch eine Bedeutung hatte, möglich ist.

Waren nun für die verschiedenen Gegenstände, etwa Beile, Dolche und Schwerter diese Reihen aufgestellt, so konnte ihre Richtigkeit durch Parallelität bestätigt werden. Das bedeutet nun keineswegs, dass für verschiedene typologische Reihen das gleiche Tempo der Entwicklung vorausgesetzt werden kann. Dies bedeutet in unserem Beispiel Folgendes:

⁸ Das Kapitelthema wurde in Anlehnung an die Arbeit von Oscar Montelius gewählt. Wenn Montelius jedoch eine allumfassende Methode für das Fach der Ur- und Frühgeschichte darstellen wollte, sind wir uns bewusst, dass das hier nicht der Fall sein kann. Viele Methoden wie Harris-Matrix und Prospektion werden hier – wenn überhaupt – nur kurz gestreift.

⁹ HARRIS Edward Cecile 1993, *Practices of Archaeological Stratigraphy*, Academic press 1993.

¹⁰ Eines der besten Programme ist wohl ArchEd, das an der TU-Wien weiterentwickelt wird. MUTZEL Petra, REITGRUBER Barbara, SCHUHMACHER Barbara 2001, *ArchEd: an Interactive Tool for Visualizing Harris Matrices*. Workshop Archäologie und Computer.

¹¹ Das arbiträre Abtiefen in gleichbleibenden Niveaus, z. B. eine Spatenlänge, kann nicht als moderne Schichtengrabung angesprochen werden. Erst das Schälen von Schichten unter Wahrnehmung eines Interface führt zur „wahren“ Schichtengrabung.

¹² THOMSEN Christian Jürgensen 1836, *Ledetraad til Nordisk Oldkyndighed* (Führer zu Nördlichen Altertümern). Udgive of „Det kongelige nordiske Oldskriftselskab“ (Herausgegeben von der Königlichen Gesellschaft für Nördliche Altertümer).

¹³ MONTELIUS Oscar 1903, *Die älteren Kulturperioden im Orient und in Europa. I. Die Methode*. Stockholm 1903, 110p.

Abbildung 1, Verlauf zweier paralleler typologischer Reihen.

1. A.....B.....C.D.....E = Reihe für Schwerter

zeitlicher Verlauf

2. A..B....C..D.E.....F = Reihe für Beile

In dieser parallelisierten Typenentwicklung sieht man, dass die Geschwindigkeit der Entwicklung in beiden Reihen unterschiedlich sein kann. Mit annähernd großer Wahrscheinlichkeit wird das Schwert vom Typ A zumeist zusammen mit Beilen vom Typ A, selten vom Typ B, aber kaum mit C und D gefunden. Beil B jedoch tritt gleich häufig mit Schwert A und B auf.

Diese Methode verlangt eine außerordentliche Feinfühligkeit für die Typologie und erwies sich zum Leidwesen nachfolgender Forschergenerationen kaum in anderen als den von Montelius ausgewählten Beispielen als derartig konsequent durchführbar. Deshalb wurde bald ein anderes Hilfsmittel gesucht und gefunden.

2.1.1.3 Kombinationsstatistik.

Sie bedient sich der kombinatorischen Methode. Ein Ausgangspunkt dazu lässt sich wieder bei Montelius finden, der einen geschlossenen Fund folgendermaßen definiert:

„Ein Fund in dieser Meinung – d. h. ein für chronologische Untersuchungen verwendbarer Fund oder, wie wir der Kürze wegen im Folgenden sagen, ein 'sicherer Fund' (oder nur ein Fund!) – kann als die Summe von denjenigen Gegenständen bezeichnet werden, welche unter solchen Verhältnissen gefunden worden sind, dass sie als ganz gleichzeitig niedergelegt betrachtet werden müssen.“

Ferner: *„Ein solcher Fund ist aber gar kein Beweis, dass sämtliche Gegenstände zur selben Zeit verfertigt wurden. Ein Gegenstand kann sehr alt, ein anderer ganz neu sein, als sie (zusammen) in die Erde kamen.“*

Im Folgenden versucht er herauszuarbeiten, dass je öfter zwei Typen zusammen gefunden werden, die Wahrscheinlichkeit, dass sie wirklich auch gleichzeitig hergestellt wurden, immer größer wird. D. h. mit anderen Worten: Jeder Gegenstand verändert sich im Laufe der Zeit mehr oder weniger schnell, aufgrund von Moden oder technologischen Neuerungen.

Mit Hilfe der kombinatorischen Methode allein lassen sich die Funde und auch die in ihnen enthaltenen Typen in eine zeitliche Reihenfolge bringen, wobei jedoch die Abfolge nicht von evolutiven Merkmalen – die man erkennen kann oder nicht – abhängig ist.

Der Ausgangspunkt für die Untersuchung der Typenkombination ist der geschlossene Fund und die zeitliche Veränderung von funktionellen Typen, sei es durch technologische Verbesserungen oder sich ändernde Moden. Diese Tatsachen müssen bei der Erstellung einer Typologie ins Kalkül gezogen werden.

Im Werdegang der kombinatorischen Methode lassen sich nun verschiedene Phasen unterscheiden:

2.1.1.3.1 Die klassische Methode.

Nach der Erstellung einer Typologie vergleicht der Archäologe eine Anzahl von Funden und versucht, sie in Hinblick auf ihre zeitliche Entwicklung zu klassifizieren. Er bestimmt Gruppen von Funden mit verwandtem Inventar und grenzt diese zeitgleichen Funde von anderen ab. Diese Methode, die „kriminalistische Fähigkeiten“ verlangt, soll durch ein kleines Beispiel, das nur aus 4 Funden und 4 Typen besteht, demonstriert werden:

Diese vier Funde (Zahlen) mögen folgende Typen (Buchstaben) enthalten:

Texttabelle 2, Liste der Funde.

Fund 1 mit den Typen C, D

Fund 2 mit den Typen A, B

Fund 3 mit den Typen B, C

Fund 4 mit dem Typ D

Andererseits könnte man auch sagen:

Texttabelle 3, Liste der Typen.

Typ A ist in Fund 2

Typ B ist in den Funden 2, 3

Typ C ist in den Funden 1, 3

Typ D ist in den Funden 1, 4 enthalten

Im Allgemeinen – abgesehen von Sonderfällen – gibt es zwei Möglichkeiten:

- alle 4 Funde sind gleichzeitig,
- sie sind chronologisch verschieden.

Indem wir uns nun auf den zweiten Fall beziehen, können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Die Funde 2 und 4 haben keinen Typ gemeinsam, deshalb sollten sie zeitlich weit voneinander entfernt sein. Dasselbe kann auch für die Funde 1 und 2 gesagt werden, sie müssen ebenfalls in großem zeitlichem Abstand angesetzt werden. Das Gleiche gilt auch für die Funde 3 und 4. Die Funde 1 und 3 enthalten beide den Typ C – deshalb sind sie durch diesen Typ chronologisch miteinander verbunden – sie folgen aufeinander. Das gilt auch für Fund 2 und 3 – ihre Verbindung ist durch den Typ B gegeben. Fund 1 und 4 sind über den Typ D verknüpft. Nun möchten wir den Versuch machen, bei der Bewertung von geschlossenen Funden eine Verbindung zwischen dieser klassischen Methode und der Seriation herzustellen.

Grafische Darstellung.

Wir können die gerade formulierten Beziehungen grafisch darstellen:

Texttabelle 4, Beziehungen zwischen geschlossenen Funden aufgrund der enthaltenen Typen.

2.....4

2.....1

....3.....4

....3...1

2...3

.....1...4

Die Abfolge der Funde muss also 2, 3, 1, 4 lauten oder genau umgekehrt 4, 1, 3, 2. Nur diese beiden Ordnungen können alle die oben angeführten Beziehungen erfüllen.

In gleicher Weise kann aus Liste 2 geschlossen werden, dass die Abfolge der Typen entweder A, B, C, D oder umgekehrt D, C, B, A ist. Aus den obigen Daten ergibt sich jedoch eines nicht, nämlich, welche der beiden Reihenfolgen nun die richtige ist. Um zu entscheiden, welche einer historischen Abfolge entspricht, ist es notwendig, z. B. mit Hilfe von stratigrafischen Daten oder durch eventuell vorhandene typologische Rudimente weitere Informationen zu erhalten.

Wenn wir diese Abfolge der Funde und Typen grafisch auftragen, erhalten wir ein rechteckiges, numerisches Zahlenschema (im folgenden Matrix genannt), in dem die Funde in horizontalen Reihen und die Typen in vertikalen Spalten angeordnet sind. Die Überschneidungspunkte, also die Positionen, an denen ein Fund und ein Typ zusammenfallen, zeigen eine Verteilung entlang der Hauptdiagonale, die in der Matrix von links oben nach rechts unten verläuft. (Siehe Abbildung 2)

Abbildung 2, geordnete Matrix von 4 Funden (1–4) und vier Typen (A–D).

	A	B	C	D
2	●	●		
3		●	●	
1			●	●
4				●

Es war relativ einfach, die zeitliche Abfolge dieser wenigen Funde und Typen durch Überlegung zu finden. Dennoch war ein beachtlicher Aufwand an Schreibearbeit notwendig, um diese Abfolge zu begründen. Es ist deshalb kein Wunder, dass die Argumentation für eine Chronologie eines wesentlich größeren Materials sich oft über viele Seiten hinzieht und deshalb vom Leser nur unter großem persönlichen zeitlichen Einsatz verstanden werden kann.¹⁴ Außerdem ist es möglich, dass wegen der großen Anzahl von Bedingungen, die alle gleichzeitig beachtet werden müssten, dem Ersteller der Chronologie manche davon entgehen oder dass er zumindest eine persönliche Auswahl an anscheinend relevanten Kombinationen trifft. Deshalb wird der Leser diese Beweisführung nicht mehr leicht nachvollziehen können.

Ein viel leichter überprüfbarer Zugang zur Chronologie besteht nun jedoch darin, die Prinzipien der Chronologie zuerst durchschaubar zu formulieren und dann z. B. diese geordnete Matrix – wie oben beschrieben – durch einen rein mechanischen Prozess zu erhalten, wie im Folgenden besprochen werden soll.

Mechanische Methoden.

*Streifenmethode von Sir William Mathew Flinders-Petrie.*¹⁵

In den Jahren 1894/95 deckten Flinders-Petrie und Quibell¹⁶ zwei größere Gräberfelder in Ägypten zwischen den Städten Ballas – im Norden – und Naqada – im Süden – auf. Zusammen ergaben sich an die 3900 Grabfunde mit zahlreichen keramischen Beigaben. Petrie erkannte, dass es möglich war, lediglich unter Benutzung der Information der darin enthaltenen Artefakte, eine zeitliche Ordnung der einzelnen Gräber zu erhalten. Er wählte 900 Gräber für seine Analyse aus. Zur Erstellung seiner Typologie unterschied er lediglich neun verschiedene Keramikklassen, für jede von ihnen erstellte er eine typologische Reihe. Diese Reihen überprüfte er mittels der Kombinationen auf ihre Parallelität. So erhielt er an die 600 Typen. Insofern nahm er bereits die typologische Methode von Montelius vorweg. Er ging aber noch weiter, indem er nun die Sequenz der Gräber feststellen wollte.

Dabei ging er folgendermaßen vor: Jedes einzelne Grab wurde in Form eines Pappkartonstreifens (ungefähr 18 cm x 1 cm) kodiert. Für jede Keramikklasse war eine Spalte vorgesehen, in die dann die Nummer des entsprechenden Typs eingetragen wurde.

Diese 900 Streifen wurden nun Breitseite an Breitseite in einer Reihe untereinander gelegt und solange umgeordnet, bis die gleichen Zahlen in den entsprechenden Spalten der Streifen möglichst beisammen lagen. Die Länge der ganzen Reihe betrug etwa 9 m. Man kann sich vorstellen, welcher Zeitaufwand hinter diesem gewaltigen Sortierprozess stand.

Nach diesem Ordnungsvorgang teilte er die 900 Gräberstreifen in 51 gleich große Gruppen, nummeriert von 30 bis 80, um später gefundene ältere Gräber sowohl davor als auch jüngere danach einordnen zu können. Diese Gruppen sind seine Sequenzdaten (SD), die wir auch für unsere Arbeit – allerdings mit den Werten von 1–1000 – verwenden wollen.

Leider liegen Petrie's ursprüngliche Daten heute nicht mehr vor und somit können seine Resultate mit modernen Methoden nicht überprüft werden. Inhaltlich fanden sie jedoch eine Bestätigung bei der Bearbeitung anderer Gräberfelder. Bei seiner Methode veränderte Petrie die starre, von Anfang an vorgegebene Anordnung der Typen nicht, was jedoch ebenfalls erwünscht sein kann, wie im Folgenden demonstriert werden soll.

Viel später setzte sich der englische Mathematiker David Kendall mit dieser Methode Petrie's auseinander,¹⁷ was ihn dazu brachte, den Ägyptologen hoch einzuschätzen und ihn für einen der bedeutendsten angewandten Mathematiker seiner Zeit zu halten.

¹⁴ Siehe z. B. KOVRIG Ilona 1963, Das awarenzeitliche Gräberfeld von Alattyán. ArchHung 40, 177–188.

¹⁵ FLINDERS PETRIE W. M. 1899, Sequences in prehistoric remains. Journal of the Anthropological Institute 29, 295–301.

¹⁶ FLINDERS PETRIE W. M., QUIBELL J. E. 1896, Naqada and Ballas. London.

¹⁷ KENDALL David G. 1963, A statistical approach to Flinders Petrie's sequence dating. Bull. Int. Stat. Inst. 40, 657 – 680.

Streifenmethode mit Zeilen- und Spaltenvertauschung.

Hier kommt zu Flinders-Petrie's Vorgangsweise hinzu, dass nicht nur die Zeilen sondern auch die Spalten vertauscht werden. Zur Demonstration der Vorgangsweise kehren wir zu unserem Beispiel zurück.

Abbildung 3, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 1.

	C	B	A	D
4				●
3	●	●		
2		●	●	
1	●			●

Zu Beginn wird die zufällig angeordnete 4x4 Matrix (in horizontale Reihenstreifen zerschnitten (Abbildung 4).

Abbildung 4, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 2.

	C	B	A	D
4				●
3	●	●		
2		●	●	
1	●			●

Diese Reihen werden solange vertauscht, bis die Punkte so nahe wie möglich an die Diagonale herangeführt werden. (Abbildung 5)

Abbildung 5, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 3.

	C	B	A	D
3	●	●		
2		●	●	
1	●			●
4				●

Jetzt wird diese Matrix ein zweites Mal aufgezeichnet. (Abbildung 6)

Abbildung 6, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 4.

	C	B	A	D
3	●	●		
2		●	●	
1	●			●
4				●

Sie wird nun senkrecht in Spaltenstreifen zerschnitten. (Abbildung 7)

Abbildung 7, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 5.

		C		B		A		D
3		•		•				
2				•		•		
1		•						•
4								•

Die Spalten werden ebenfalls solange miteinander vertauscht, bis sich die Punkte in der Nähe der Diagonale konzentrieren. (Abbildung 8)

Abbildung 8, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 6.

		B		A		C		D
3		•				•		
2		•		•				
1						•		•
4								•

Dann wird die Matrix zum zweiten Mal neu gezeichnet. (Abbildung 9)

Abbildung 9, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 7.

	B	A	C	D
3	•		•	
2	•	•		
1			•	•
4				•

Dann beginnt man wieder von vorne, zeichnet von neuem und zerschneidet wieder in Reihenstreifen usw. (Abbildung 10 – Abbildung 14 und die Lösung in Abbildung 15)

Abbildung 10, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 8.

	B	A	C	D
3	●		●	
2	●	●		
1			●	●
4				●

Abbildung 11, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 9.

	B	A	C	D
2	●	●		
3	●		●	
1			●	●
4				●

Abbildung 12, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 10.

	B	A	C	D
2	●	●		
3	●		●	
1			●	●
4				●

Abbildung 13, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 11.

	B	A	C	D
2	●	●		
3	●		●	
1			●	●
4				●

Abbildung 14, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 12.

	A	B	C	D
2	●	●		
3		●	●	
1			●	●
4				●

Abbildung 15, Ordnung einer Matrix durch die Streifenmethode 13.

	A	B	C	D
2	●	●		
3		●	●	
1			●	●
4				●

Dieser Prozess wird nur solange durchgeführt, bis eine weitere Vertauschung der Reihen oder Spalten keine Verbesserung des Resultats erbringen kann, wie in der letzten Abbildung 15.

Man kann sich sehr leicht vorstellen, dass schon bei Matrizen mit ca. 20 Funden mal 20 Typen ziemlich viele Arbeitsschritte zur Erreichung des gewünschten Resultates notwendig werden.

Dieses Phänomen der Anordnung der Besetzungspunkte an der Diagonale wird nach ihrem Entdecker „*Flinders-Petrie Petries'sches Konzentrationsprinzip*“ oder „*Petrifikation*“ genannt.

Mathematische Verfahren und entsprechende Algorithmen für Computerprogramme.

Der Axis-Algorithmus.

Aus einer großen Anzahl von Vorschlägen, wie man die Seriation mit mathematischen Mitteln durchführen könnte, wollen wir uns zunächst mit demjenigen beschäftigen, der uns der elementarste Ansatz zu sein scheint. Offensichtlich unabhängig voneinander kamen die drei Wissenschaftler Wilkinson,¹⁸ Legoux¹⁹ und Goldmann²⁰ zur selben Lösung. Ihre arithmetische Vorschrift – im Folgenden werden wir eine solche Vorschrift Algorithmus nennen – sieht folgendermaßen aus:

- Berechne die Mittelwerte der Besetzungen (Inzidenzen) in den Spalten.
- Ordne die Spalten in Abhängigkeit von ihren Mittelwerten.
- Berechne die Mittelwerte der Besetzungen in den Reihen.
- Ordne die Reihen entsprechend ihren Mittelwerten.
- Beginne von vorne und setze solange fort wie notwendig.

Um diese für Mathematiker trivialen, aber für viele Archäologen vielleicht immer noch „zu mathematischen“ Formulierungen zu erklären, möchten wir eine Anwendung mit unserem Beispiel, jedoch mit einer anderen Ausgangsordnung zeigen.

¹⁸ WILKINSON Edward Martin 1974, Techniques of Data Analysis – Seriation Theory. Archaeo-Physika 5, 1–142.

¹⁹ LEGOUX Rene 1980, Le recours a l'informatique: La chronologie relative par permutation matricielle automatiques. In: Patrick Perin, La Datation des tombes Merovingiennes. Hautes Etudes Medievales et modernes 39, 138–155.

²⁰ GOLDMANN Klaus 1980b, Die Seriation chronologischer Leitfunde der Bronzezeit. Berliner Beiträge zur Vorgeschichte 1, 196p.

Abbildung 16, Ordnung einer Matrix durch den Axis-Algorithmus 1.

	B	A	D	C	
3	●			●	1
2	●	●			2
4			●		3
1			●	●	4

1	2	3	1
+		+	+
2		4	4
=	=	=	=
3	2	7	5
:	:	:	:
2	1	2	2
=	=	=	=
1.5	2	3.5	2.5
1.	2.	4.	3.

Zuerst suchen wir die Inzidenzpunkte des Typs B in den Funden 3 und 2 und notieren uns ihre Position, die durch die rechts außerhalb stehenden Ordnungszahlen der zugehörigen Zeilen angezeigt ist. Der Fund 3 enthält einen Inzidenzpunkt mit dem Typ B in der Position 1. Diesen Einser schreiben wir unter die Spalte von B. Die 2. Besetzung wird im Fund 2 an der Position 2 gefunden, dafür schreiben wir unter obig notiertem Einser einen Zweier. Unter der Spalte B stehen nun die Zahlen 1 und 2, sie werden addiert und durch die Anzahl der Besetzungen dividiert – in diesem Fall durch 2. Das Resultat (1.5) ist der Mittelwert der Inzidenzpunkte in der Spalte B. Wir gehen ganz analog mit den Spalten A, D und C vor – so erhalten wir die Mittelwerte aller Spalten. Bis jetzt haben wir nur den Punkt (1) des Algorithmus der Seriation erfüllt. Für den Punkt (2) ordnen wir nun die Spalten entsprechend ihren Mittelwerten um: die Spalte B mit dem niedrigsten Mittelwert von 1.5 kommt an die erste Stelle, gefolgt von A mit dem Mittelwert 2, von C mit 2.5 und zuletzt D mit 3.5. So erhalten wir die neu geordnete Matrix. (Siehe Abbildung 16)

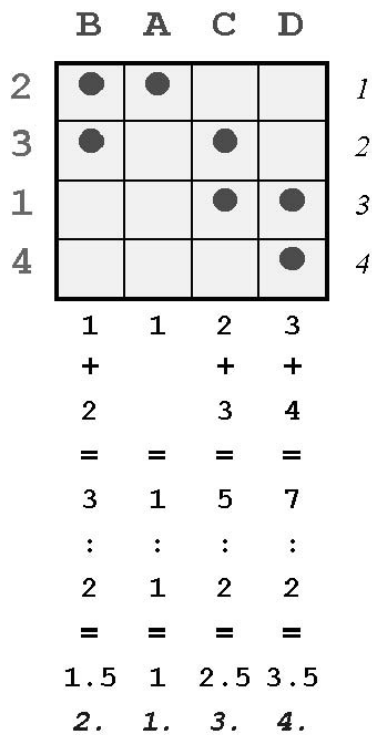
Abbildung 17, Ordnung einer Matrix durch den Axis-Algorithmus 2.

	B	A	C	D	
3	●		●		$1 + 3 = 4 : 2 = 2$ 2.
2	●	●			$1 + 2 = 3 : 2 = 1.5$ 1.
4				●	$4 + = 4 : 1 = 4$ 4.
1			●	●	$3 + 4 = 7 : 2 = 3.5$ 3.

1	2	3	4
---	---	---	---

Punkt (3) der arithmetischen Vorschriften verlangt die Berechnung der Mittelwerte der Reihen dieser neuen Matrix, die Zwischenergebnisse sind an der rechten Seite der Matrix (siehe Abbildung 17) niedergeschrieben. Die erforderlichen Positionsnummern sind unterhalb der Matrix zu finden. Für Punkt (4) werden diese Reihen so umgeordnet, dass die Reihe mit dem niedrigsten Mittelwert zu oberst liegt usw. Nun beginnt die gesamte Prozedur von vorne.

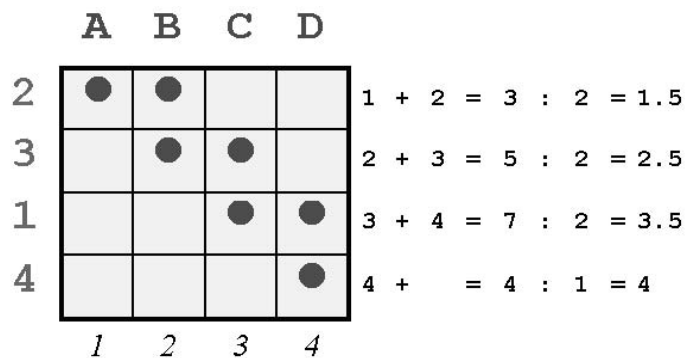
Abbildung 18, Ordnung einer Matrix durch den Axis-Algorithmus 3.



Der Abbruch erfolgt nach zweimaliger Durchführung der Schritte (1) – (5).

Man kann nun aus der Abbildung 19 ersehen, dass die Reihen aufsteigende Mittelwerte besitzen. Eine Fortsetzung wäre also unnötig und ergäbe keine weitere Veränderung der Matrix. So haben wir also mit Hilfe dieses mathematischen Verfahrens dasselbe Resultat wie mit der klassischen und auch mit der Streifenschneidemethode erreicht. Anwendungsbeispiele, bei denen eine viel größere Zahl von Funden und Typen vorliegt, führen bald zu sehr langwierigen Berechnungen. Diese können sinnvoll nur von einem Computer durchgeführt werden. Genauso wie wir die Erklärung der Prinzipien der mathematischen Vorschrift in kleine, verständliche Schritte zerlegt haben, wird dies in einem Computerprogramm getan, damit der Computer diese Vorschrift „verstehen“ kann.

Abbildung 19, Ordnung einer Matrix durch den Axis-Algorithmus 4.



2.1.1.3.2 Das Axiom der Seriation.

Diejenige Ordnung einer Inzidenzmatrix von archäologischem, chronologisch auswertbarem Material, die eine optimale Anordnung aller Inzidenzpunkte entlang der Hauptdiagonale ergibt, zeigt die durchschnittliche zeitliche Abfolge der Typen und Funde. Die Richtung dieser Abfolge muss mit anderen Mitteln bestimmt werden.

2.1.1.3.3 Korrespondenzanalyse oder Reciprocal Averaging.

Von kleinen Unterschieden abgesehen, ist der Axis-Seriationsalgorithmus mit der in der Mathematik seit etwa 1970 in Mode gekommenen Korrespondenzanalyse ident. Bei diesem Verfahren sollen Zeilen und Spalten einer Kontingenztafel so geordnet werden, dass die Korrelation zwischen ihnen ein Maximum erreicht.

Diese Kontingenztafel ist genauso wie die Inzidenzmatrix ein rechteckiges Zahlenschema. Nur sind hier die Inzidenzen zwischen einer Zeile und Spalte nicht durch 0 oder 1 ausgedrückt, sondern durch die absoluten Häufigkeiten. Wäre z. B. ein Typ in einem Fund dreimal enthalten, so würde in die Kontingenztafel an der Überschneidungsstelle 3 einzutragen sein. Anstelle der Rangordnungen wird hierbei direkt mit den Mittelwerten operiert. Der Vorteil dieses Algorithmus liegt darin, dass das zeitaufwendige Sortieren der Schwerpunkte entfallen kann. Außerdem ist dieses Verfahren auch besser mathematisch fundiert.

Der von Peter Ihm²¹ vorgeschlagene Algorithmus zur Durchführung einer Seriation sieht nun folgendermaßen aus:

- (1) Belegen der Schwerpunkte der Zeilen mit ihrer Ordnungszahl.
- (2) Belegen der Schwerpunkte der Spalten mit ihrer Ordnungszahl.
- (3) Berechnung der Schwerpunkte der Zeilen aus den absoluten Häufigkeiten der Besetzungen unter Verwendung der bisherigen Mittelwerte (anstelle der Rangordnungen) für die Spalten.
- (4) Normierung der für die Zeilen erhaltenen Schwerpunkte.
- (5) Besetzung der Mittelwerte der Spalten mit ihren absoluten Häufigkeiten der Besetzungen unter Verwendung des bisherigen Mittelwertes für die Zeilen.
- (6) Normierung der Schwerpunkte für die Spalten.
- (7) Abbruch, wenn die letzte Veränderung für jeden Schwerpunkt der Zeilen unter einem vorgegebenen Wert ε liegt.
- (8) Abbruch, wenn die letzte Veränderung für jeden Schwerpunkt der Spalten unter einem vorgegebenen Wert ε liegt.
- (9) Neubeginn bei (3).

Die Schritte (1) und (2) werden nur beim 1. Durchlauf vollzogen, um die Schwerpunktsvektoren zu initialisieren. Die Normierungen in den Schritten (4) und (6) sind notwendig, damit die Mittelwerte nicht zu stark expandieren. Dieser stark vereinfachte Ansatz der Korrespondenzanalyse, eben das Reciprocal Averaging, liefert den Hauptfaktor der Eigenvektoren. Wenn man auch andere Komponenten fassen will – nicht immer ist der Faktor Zeit in der ersten Komponente zu finden – dann muss man die gewöhnliche Korrespondenzanalyse verwenden.²²

2.1.1.3.4 Prinzip der Dynamischen Typologie.

Für jede Seriation ist die Typologie ausschlaggebend. Da die Typologie oft sehr subjektiv ist, versucht man nun aus einer starren statischen Typologie zu einer objektiv besseren dynamischen Typologie zu gelangen.²³

Unser Konzept für die dynamischen Typologie bedeutet Folgendes: Wenn ein Typ in einem Seriationsergebnis als Durchläufer erscheint, kann das mehrere Ursachen haben, unter anderem könnten hier Typen vermengt oder zu grob gefasst worden sein. Wenn sich Merkmale eines Typs in einem älteren Abschnitt signifikant von Merkmalen im jüngeren Bereich unterscheiden, so können durch Aufspaltung zwei neue Typen erhalten werden. Insgesamt führt dieses Verfahren zu einer Seriationsverbesserung.

Dynamische Typologie ist somit nichts anderes als eine lernfähige Typologie. Die Typologie wird von Zwischenergebnissen beeinflusst und verändert. Diese Veränderung wirkt sich natürlich wieder auf das Seriationsresultat aus. In einem iterativen Prozess gelangt man somit in mehreren Schritten zu einer Typologie, die optimal an die Forderungen, chronologische Merkmale zu entdecken, angepasst ist.

Die Seriation bewährt sich vor allem dort, wo keine anderen Methoden wirksam werden können. Sie liefert eine mittlere Abfolge der verschiedenen Merkmale/Typen und Fundkomplexe.

Das Prinzip der dynamischen Typologie soll anhand eines einfachen Beispiels dokumentiert werden.

²¹ IHM Peter 1983, Korrespondenzanalyse und Seriation. Archäologische Informationen 6/1, 8–21.

²² BENZÉCRI J.-P. Correspondence Analysis Handbook, translated by T. K. Gopalan, Marcel Dekker, 1992. MURTAGH Fionn 1986, Source code für Korrespondenzanalyse in Fortran.
<http://astro.u-strasbg.fr/~fmurtagh/mda-sw/>.

²³ Falko Daim meint in DAIM Falko 1987, Das awarische Gräberfeld von Leobersdorf, NÖ. Studien zur Archäologie der Awaren 3, Seite 28, „Definitionen von Typen können – beachtet man die Grundregeln – nicht richtig oder falsch, sondern nur vom pragmatischen Gesichtspunkt her günstig oder ungünstig sein.“

Abbildung 20, Dynamische Typologie I.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
A	•	•										A
B	•	•	•			•						B
C		•	•	•		•						C
D			•	•	•	•						D
E				•	•	•						E
F					•	•	•					F
G						•	•	•				G
H						•	•	•	•			H
I						•		•	•	•		I
J									•	•	•	J

Wir sehen, dass der Typ 6 offensichtlich ein Durchläufer ist. Er kann nun wirklich ein Durchläufer sein, wenn wir in keinem Merkmal Hinweise auf eine zeitliche Dynamik feststellen können. Es könnte aber auch anders sein, wie wir im Folgenden sehen werden.

Abbildung 21, Dynamische Typologie II.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
A	•	•										A
B	•	•	•			•						B
C		•	•	•		•						C
D			•	•	•	•						D
E				•	•	•						E
F					•	•	•					F
G						•	•	•				G
H						•	•	•	•			H
I						•		•	•	•		I
J									•	•	•	J

Stellen wir uns nun vor, dass sich im Typ 6 die oberen vier Besetzungspunkte durch ein signifikantes Merkmal von den unteren vier Vertretern unterscheiden. Dies markieren wir zunächst durch die unterschiedlichen Farben rot und grün.

Nun ist es gerechtfertigt, den ursprünglichen Typ 6 in die zwei Typen 6a und 6b aufzuspalten. Das Ergebnis sehen wir in Abbildung 22: Typ 6a ist nun viel früher zu finden, Typ 6b viel später als vorher Typ 6, insgesamt ist es zu einer Verbesserung des Seriationsergebnisses gekommen, denn es gibt keine Durchläufer mehr.

Abbildung 22, Dynamische Typologie III.

	1	2	3	6a	4	5	7	6b	8	9	10	11	
A	•	•											A
B	•	•	•	•									B
C		•	•	•	•								C
D			•	•	•	•							D
E				•	•	•							E
F						•	•	•					F
G							•	•	•				G
H							•	•	•	•			H
I								•	•	•	•		I
J										•	•	•	J
	1	2	3	6a	4	5	7	6b	8	9	10	11	

2.1.1.3.5 Exkurs zu den verschiedenen Möglichkeiten bei der Erstellung einer Typologie.

In Tabelle 8 auf Seite 232 ist eine zeitliche Abschätzung zu den verschiedenen Wegen bei Erstellung einer Typologie gegeben.

- 1) Beschreibungen in Form eines Katalogs: Das kennt man wohl aus den meisten Publikationen. Durch Verwendung von Volltexteingaben wird die weitere Brauchbarkeit reduziert. Nur selten werden standardisierte Begriffe verwendet.²⁴ Auch die anderen Kriterien in der Tabelle werden nicht erfüllt.
- 2) Definition von Merkmalen: Die An- oder Abwesenheit von Merkmalen aber auch Messergebnisse können zur Definition von Typen herangezogen werden. In diesem Fall werden die Merkmale aus der Kenntnis des Materials vorgegeben und die Maße ausgewählt. Alle Gegenstände werden sukzessive durch diese Merkmale und Maße definiert, ohne dass dabei der Überblick über die Gesamtheit gewahrt bleibt. Jeder kennt die so genannten Merkmalslisten aus Publikationen, oft noch begleitet von einer Kartierung der Verteilung. Eine Überprüfung ist nur möglich, wenn man die Zitate bis in die Originalpublikationen verfolgt, eine mühsame Arbeit, der sich kaum jemand unterzieht. Somit kann kaum eine Standardisierung erreicht werden. Da keine Bilddaten aktuell vorliegen, ist auch die Transparenz nicht gewährleistet. Insgesamt ist das Verfahren sehr zeitaufwändig.

²⁴ Daher ist es besser, dass man aus einer mit Methode 2) oder weitere erstellten Datenbank einen Katalog automatisch ausdrucken lässt. Siehe z. B. DONEUS Michael 2001, Die Keramik der mittelnolithischen Kreisgrabenanlage von Kamegg, Niederösterreich. Ein Beitrag zur Chronologie der Stufe MOG I der Lengyelkultur. MPK 46, 471p. Der Vorteil eines solchen Kataloges ist, dass er leichter gelesen werden kann als der Zahlenfriedhof einer kodierten Tabelle.

- 3) Benutzung eines Thesaurussystems: Dadurch ist gewährleistet, dass im Falle von Texteingaben diese standardisiert sind. Außerdem können die Eingaben beschleunigt werden, wenn Texteingaben nicht getippt werden müssen, sondern einfach nur in einem Dropdown-Menü ausgewählt werden. Wir hatten dieses System in unserem Programm InputMachine realisiert. Mit Hilfe dieses Programms konnten die Eingaben zur gesamten Sammlung der Prähistorischen Abteilung in etwa 3 Jahren getätigt werden, obwohl mehr als 100.000 Einträge notwendig waren. Schon von Anfang war klar, dass das nur ein Werkzeug zur Inventarverwaltung nicht aber für wissenschaftliche Fragestellungen sein würde. Eine gewisse Vollständigkeit der Eingabe war damit erreichbar, niemals aber konnten die für eine Typologie notwendigen Kriterien erfüllt werden. In diesem Fall könnte die Textdatenbank durch eine Bilddatenbank ergänzt werden.²⁵
- 4) Jahrelang, auch nach Fertigstellung meiner Dissertation verwendete ich reale Typentafeln, auf denen die einzelnen, aus der Literatur fotokopierten und manuell ausgeschnittenen Gegenstände gesammelt wurden. Im Laufe von mehr als 10 Jahren füllten sich so an die 60 Ordner mit insgesamt etwa 4000 Typentafeln. Die Einordnung neuen Materials gestaltete sich zunehmend langwieriger, ab 1996 habe ich dann diese Art der Erfassung eingestellt. Denn zusätzlich zur physischen Sammlung kam noch, dass man gleichzeitig mit den Eingaben in den Ordnern eine Datenbank synchronisieren musste. Der Vorteil dieses Systems gegenüber den oben angeführten war jedoch bereits die Erfüllung der Standardisierungskonsistenz, der Transparenz durch überprüfbare Bilddaten. Dazu kam die – aus heutiger Sicht betrachtet – ziemlich schwierige Durchführung einer dynamischen Typologie. Insgesamt war dieses Verfahren wohl das zeitaufwändigste von allen.
- 5) Ab dem Jahr 1999 begannen wir dann mit dem Scannen der Abbildungen aus der Literatur und der Erfassung der Bilder in der Fundkomplexhierarchie der Bilddatenbank Montelius mit gleichzeitiger Eingabe von beschreibenden Elementen in einer einfachen Excel-Tabelle. Grosse Probleme machten hier diskrepante Eingaben zwischen Bildstruktur und Informationen in der Excel-Tabelle. Diese Fehler mussten langwierig korrigiert werden. Danach jedoch konnten die erfassten Gegenstände in die typologische Anordnung gebracht werden, von wo aus mittels Bildbrowser ACDSec eine dynamische Typologie durch „Drag 'n Drop“ möglich wurde. Die Veränderungen in der Bildstruktur der Typologie konnten nun ausgelesen werden und automatisch auf das Excel-File übertragen werden. Durch diese Vorgangsweise konnte die Erstellung oder Bearbeitung einer Typologie **gegenüber Methode 4) etwa auf das hundertfache beschleunigt werden.**
- 6) Der nächste, nahe liegende Schritt war nun die Entwicklung von MonteliusEntry (siehe Seite 66). Mit Hilfe dieses Programms, derzeit bereits durch das „Feedback“ der zahlreichen Mitarbeiter bereits in Version 3.56, wird gewährleistet, dass die Bilder an die richtige Stelle in der Hierarchie gespeichert werden, gleichzeitig aber auch konsistente Eingaben in der Excel-Tabelle vorliegen. Eventuelle Fehler können mit der einfachen Bearbeitungsmöglichkeit im Edit-Mode korrigiert werden. Alle beschreibenden Elemente wie Rohtypologie, Angaben zum Fundort etc. können einfach durch Auswählen aus einem Thesaurussystem eingegeben werden. Damit ist es nun möglich, dass die Mitarbeiter im Schnitt pro Stunde etwa 60 Eingaben oder mehr machen können. Bis jetzt konnten so an die 320.000 Eingaben realisiert werden. Die dynamische Typologie ist nun genauso wie bei 5) weiterhin gegeben, dieser Schritt (6) spielte also vor allem für die Beschleunigung der Eingaben eine Rolle.
- 7) Die nächste geplante Weiterentwicklung sieht die Programmierung eines eigenen Bildbrowsers vor, der direkt in Montelius integriert werden soll. Damit könnte eine Schwachstelle von Montelius beseitigt werden. Werden Korrekturen in der Bildstruktur der Fundkomplexe gemacht, dann muss man derzeit dieselben Änderungen im Excel-File durchführen, also eine redundante Arbeit. In Zukunft sollen alle Änderungen mit einem eigenen Bildbrowser gemacht werden, wodurch die Korrekturen automatisch im internen Excel-File präsent sind. Das würde vor allem für den Hauptverwalter der Bilddatenbank noch einiges an Zeitersparnis bedeuten.

2.1.1.4 Horizontalstratigrafie.

In der archäologischen Fachliteratur ist es üblich, Verbreitungskarten mit Zitatlisten zusammenzustellen. Da diese Arbeit sehr mühsam ist, sind nur wenige Promille des vorhandenen archäologischen Fundmaterials bisher kartiert worden. Es lassen sich prinzipiell 2 Arten von Kartierungen unterscheiden:

- Lokale Kartierung: Hierbei handelt es sich zumeist um Gräberfeld- oder Siedlungspläne, auf alle Fälle jedoch um Pläne von archäologischen Ausgrabungen. Auf diesen Plangrundlagen soll dann die Verbreitung des archäologischen Fundmaterials dargestellt werden. Eine der Grundlagen zur Interpretation ist die Theorie der Belegungschronologie. Die Vertikalstratigrafie folgt der Logik, Belegungschronologie lediglich der Überlegung, dass der Mensch z. B. bei der Anlage von Gräbern während der Benützungszeit

²⁵ STADLER Peter 1997b, Die Sammlungsdatenbank der Prähistorischen Abteilung des Naturhistorischen Museums in Wien. URL: "http://www.nhm-wien.ac.at/NHM/prehist/Stadler/SammlungPA_G.html."

eines Gräberfeldes irgendeinem System gefolgt ist. Vergleiche Falko Daim.²⁶ Die sehr unglückliche Bezeichnung „Horizontalstratigrafie“ verwischt diesen sehr grundsätzlichen Unterschied zur Vertikalstratigrafie. Diese Kartierungen können mit dieser theoretischen Grundlage interpretiert werden, was meistens chronologisch gemacht wird. Man versucht Gruppierungen auf dem Plan zeitlich zu interpretieren und sie in Ermangelung einer Vertikalstratigrafie in eine Horizontalstratigrafie zu bringen. Die Kartierungspunkte sind zumeist archäologische Fundkomplexe, wie Gräber oder Siedlungsgruben.

- Globale Kartierung: Kartierungsgrundlage dafür sind Karten von Großräumen, die regional oder überregional sind. Die Kartierungspunkte sind archäologische Ausgrabungen. Derartige Kartierungen werden selten in Richtung einer Chronologie ausgewertet. Vielmehr sucht man durch sie Informationen über regionale Gruppen zu finden, die dann als Siedlungs-, Werkstätten-, kulturelle oder ethnische Gruppen interpretiert werden können.

Mit der heutigen Technologie von GIS-Systemen in Verbindung mit Datenbanken ist es um vieles leichter geworden, diese Kartierungen zu erstellen. Bis jetzt ist uns aber keine Applikation bekannt, bei der jeder Gegenstand durch sein genaues Zitat erfasst worden ist, um die von den Archäologen gewünschten Nachweislisten automatisch zu erstellen. Das konnten wir also in unserem Programmpaket (siehe unten) erstmals implementieren, wobei sich die Verwendung der Bilddatenbank Montelius als nützlich erwies.

Heute kann man nun die Verbreitungskarten nach Belieben erstellen, gleichzeitig erhält man damit eine solche Informationsflut, dass sie kaum mehr zu überblicken ist. Das verlangt nun nach einer neu zu entwickelnden Methodik, bei der alle Einzelkartierungen statistisch untersucht werden und automatisch zu Gesamtkartierungen zusammengesetzt werden können, die die Information aller einzelnen Karten in einem Gesamtergebnis darstellt. Eine derartige Methode haben wir mit der „Analyse der N Nächsten Nachbarn“ entwickelt, die im Folgenden dargestellt und durch verschiedene Beispiele aus der Ur- und Frühgeschichte erläutert werden soll. Dabei ist es möglich die Kartierung von jeweils einem Merkmal oder Typ pro Karte vorzunehmen oder zwei Merkmale oder Typen in einer Kartierung miteinander zu vergleichen.

2.1.1.4.1 Analyse der „N Nächsten Nachbarn mit einem Typ“.

Es handelt sich um ein Verfahren, das schon an anderer Stelle beschrieben worden ist.²⁷

Zunächst werden Verbreitungskarten erstellt und durch statistische Tests auf signifikant nicht zufällige Verteilungsmuster untersucht. Wahlweise werden die hypergeometrische oder die binomiale Verteilung herangezogen.²⁸ Mit ihrer Hilfe wird ein Erwartungswert errechnet, der angibt, welche Häufigkeit eines Merkmals (oder Typs) innerhalb der „N Nächsten Nachbarn“ eines Fundkomplexes zufällig zu erwarten wäre. Dies wird für alle Vertreter eines Typs wiederholt.

Im Folgenden (in Texttabelle 4 und 5) wollen wir die beiden implementierten Verteilungen mathematisch etwas näher beleuchten:

²⁶ DAIM Falko 1987, Das awarische Gräberfeld von Leobersdorf, NÖ. Studien zur Archäologie der Awaren 3, 470p, speziell 28–33.

²⁷ Peter Stadler 1990, Kombinierte Auswertung archäologischer und anthropologischer Daten eines Gräberfeldes. Archäologische Informationen 12/2, 249–250. Ders. 1996, Quantitative Auswertung des awarenzeitlichen Gräberfeldes von Kölked Feketekapu A mittels Seriation und Analyse der „N Nächsten Nachbarn“,.. In: Attila Kiss, Das awarenzeitlich gepidische Gräberfeld von Kölked Feketekapu. Studien zur Archäologie der Awaren 5, 363–396, Verbreitungskarten 49–81 und Kombinationskarten 1–5.

²⁸ Es können theoretisch auch andere Verteilungen verwendet werden, z. B. die Poissonsche Verteilung. Diese sind derzeit noch nicht implementiert. Was die beiden bereits anwendbaren Verteilungen anlangt, sind die Unterschiede in den Resultaten minimal.

Texttabelle 5, Berechnung der Binomialverteilung.²⁹

$$p = \frac{M}{N}$$

$$(x = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$$

$$f(x) = \binom{n}{x} \left(\frac{M}{N}\right)^x \left(1 - \frac{M}{N}\right)^{n-x}$$

wobei $\binom{n}{x} = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-x+1)}{x!}$ bedeutet.

$f(x)$ = Wahrscheinlichkeit, dass genau x Nächste Nachbarn mit dem gleichen Merkmal unter den N NN gefunden werden

p = Wahrscheinlichkeit, dass ein Merkmal auftritt $p = M/N$

q = Wahrscheinlichkeit, dass ein Merkmal nicht auftritt $\implies q = 1 - p$

x = $0, 1, \dots, n$, Anzahl der Treffer bei der ANN

n = Anzahl der Nächsten Nachbarn, die verglichen werden

N = Gesamtzahl der Komplexe (je nach NeigMode)

NeigMode = 0 \implies wenn Frequencies=Off $\implies N$ = Gesamtzahl der Komplexe
wenn Frequencies=On $\implies N$ = Gesamtzahl der Komplexe*mittlere Häufigkeit

NeigMode $\neq 0 \implies N$ = Anzahl der Komplexe mit Merkmal $\implies N = M$

M = Zahl der Komplexe mit einem Merkmal

²⁹ KREYSZIG Erwin 1977, Statistische Methoden und ihre Anwendungen, 109.

Texttabelle 6, Berechnung der Hypergeometrischen Verteilung.³⁰

$$f(x) = \frac{\binom{M}{x} \binom{N-M}{n-x}}{\binom{N}{n}}$$

wobei $\binom{M}{x} = \frac{M * (M-1) * (M-2) * \dots * (M-x+1)}{x!}$ bedeutet.

$\binom{N-M}{n-x}$ und $\binom{N}{n}$ sind analog dazu zu berechnen.

$f(x)$ = Wahrscheinlichkeit, dass genau x Nächste Nachbarn mit dem gleichen y Merkmal unter den N NN gefunden werden

N = Gesamtzahl der Komplexe (je nach NeigMode)

NeigMode = 0 ==> wenn Frequencies=Off ==> N = Gesamtzahl der Komplexe

wenn Frequencies=On ==> N = Gesamtzahl der Komplexe*
mittlere Häufigkeit

NeigMode \neq 0 ==> N = Anzahl der Komplexe mit Merkmal ==> $N = M$

M = Zahl der Komplexe mit einem Merkmal

x = 0,1,...,Minimum(n,M) Anzahl der Treffer bei der ANN

n = Anzahl der Nächsten Nachbarn, die verglichen werden

Unter Vorgabe eines Konfidenzintervalls kann dann bestimmt werden, ob die tatsächlich ermittelte Anzahl der Nachbarn mit dem gleichen Merkmal zufällig sein könnten oder nicht, in Gültigkeit für dasjenige Signifikanzniveau, das zur Ermittlung des Konfidenzintervalls notwendig war.

In Tafel 2 präsentieren wir das Ergebnis einer signifikanten Kartierung.

In der Zeile oberhalb jeder Verbreitungskarte finden wir die wichtigsten Parameter für die aktuelle Auswertung dieser Kartierung, siehe z. B. Tafel 2:

aktuelle Parameter:NextNeiN=20 KonfNivN=3 Normkoo=0 Frequ=On

NextNeiN bestimmt die Anzahl der N Nächsten Nachbarn mit 20, die Wahrscheinlichkeit beim Konfidenzniveau 3 beträgt 80%, Frequ=On bedeutet, dass mehrfache Häufigkeiten in einem Fundkomplex mitberücksichtigt werden. In der untersten Zeile sehen wir die ermittelten Daten für die Signifikanzberechnung:

H= 23 [30], wirklicher M. w.= 0.63, erwarteter M. w.= 0.32, Differenz= 0.32, Konfidenzniveau=100.0%

Zuerst folgt der Wert H , d. h. die Häufigkeit des kartierten Typs, in Klammern die Häufigkeit mit Wiederholungen in einem Fundkomplex, dann der wirkliche, also durch Abzählung und Division durch die Anzahl H bestimmte

³⁰ KREYSZIG Erwin 1977, Statistische Methoden und ihre Anwendungen, 120.

Mittelwert von gleichen Typen im Bereich der N (=20) Nächsten Nachbarn. Ferner der erwartete – also zufällig zu erhaltende – Mittelwert, wie er aus den Häufigkeiten nach dem entsprechenden Verteilungsmodell, also in diesem Fall der hypergeometrischen Verteilung berechnet werden kann. Im **Konfidenzniveau=100%** wird ausgedrückt, dass der wirkliche Mittelwert gegenüber dem erwarteten Mittelwert um so vieles höher ist, dass mit 100% Sicherheit angenommen werden kann, dass die Verteilung nicht zufällig ist.

Befinden sich in der Umgebung eines Komplexes mit einem bestimmten Typ tatsächlich Vertreter desselben Typs und ist die Verteilung signifikant nicht zufällig, so werden dieser Komplex und die zugehörigen Nachbarn in eine Liste von Beziehungen zwischen den Komplexen aufgenommen, ähnlich wie unterschiedliche Gegenstandstypen in einem geschlossenen Fund. Diese Matrix aus Beziehungen und Komplexen wird sodann einer Seriation – dem Reciprocal Averaging³¹ – unterzogen. Der erhaltene Eigenvektor der Funde wird mit einer eindimensionalen Clusteranalyse in „natürliche“ Gruppen zerlegt.³² Diese werden sodann auf dem Gesamtplan dargestellt.

Es ist also ein Verfahren, bei dem in Abhängigkeit von der Signifikanz einer Verteilung, ein zufälliges „Hintergrundrauschen“ unterdrückt werden kann. Da hier zunächst die Anzahl der nächsten Nachbarn und andererseits das Konfidenzniveau willkürlich ausgewählt werden, bei dem eine Aussonderung erfolgt, hat Peter Ihm³³ gemeint, dass es nützlich wäre, einfach den bei Vorgabe eines Konfidenzintervalls ermittelten Konfidenz-Koeffizienten als Gewicht in der Seriation mit zu verwenden. Dadurch bliebe ein zu radikales Abschneiden aller Daten unterhalb des Konfidenzniveaus erspart. Das haben wir allerdings bis jetzt noch nicht implementiert.

Anders formuliert könnte man auch sagen: Die Analyse der „N Nächsten Nachbarn mit einem Typ“ versucht, die allen Kartierungen gemeinsamen Grundstrukturen oder Verbreitungsmuster herauszufinden, unter gleichzeitiger Unterdrückung eines statistisch bedingten Rauschuntergrundes, und diese erkannten Gemeinsamkeiten in Form einer Gesamtkarte darzustellen. Oder – mit anderen Worten – das Ergebnis ist eine Karte, die alle Einzelkartierungen zusammenzufassen versucht.

Um das bisher Gesagte zur „Analyse der N Nächsten Nachbarn“ zu veranschaulichen, sollen einige Beispiele aus der Ur- und Frühgeschichte gegeben werden. Die Beispiele stammen von verschiedenen Teilbereichen der Bilddatenbank Montelius.

Bemerkungen zu den hier präsentierten archäologischen Fundplätzen.

Brunn am Gebirge Wolfholz³⁴ ist eine frühneolithische Siedlung, die ich selbst zwischen 1989 und 1999 ausgraben durfte, in der offenbar ein Übergang von der Spätstarčevo-Kultur zur Linearbandkeramik erstmals fassbar wird. Auf den Kartierungen sind die Fundstellen I-V dargestellt, jeweils durch die entweder ausgegrabenen oder nur prospektierten Häuser, die schematisch als Rechteck dargestellt und durch eine laufende Nummer gekennzeichnet sind. Bis jetzt konnten 64 Hausgrundrisse festgestellt werden.

Franzhausen I³⁵ ist neben Franzhausen II das bedeutendste frühbronzezeitliche Gräberfeld in Österreich und damit auch der Schlüssel für Fragen zur Absolutchronologie der Frühen Bronzezeit.

Altenerding³⁶ ist eines der größten, komplett publizierten Gräberfelder der Merowingerzeit, das uns Aufschlüsse zur Ethnogenese der Bajuwaren geben kann. Aus diesem Grund habe ich schon sehr früh mit seiner quantitativen Auswertung begonnen.

Nevolino³⁷ ist zum Großteil ein Gräberfeld von der Mitte des 6. – Anfang des 9. Jh.s, das jedoch mit dem awarischen Khaganat aufgrund seiner Lage im Ural nur am Rande zu tun hat. Offensichtlich handelt es sich um ein „Reihengräberfeld“.

Beispiele für Kartierungen eines Typs.

In Tafel 2 sehen wir die Kartierung des Merkmals Fingertupfenleiste00010 auf dem Siedlungsplan von Brunn am Gebirge, Flur Wolfholz. Man sieht, dass diese Kartierung nur die älteste Fundstelle II betrifft. Allerdings muss man

³¹ Siehe oben, Seite 27.

³² Siehe oben, Seite 74.

³³ IHM Peter, mündliche Mitteilung.

³⁴ LENNEIS Eva, STADLER Peter, WINDL Helmut 1996, Neue ¹⁴C-Daten zum Frühneolithikum in Österreich, *Préhistoire Européenne* 8, 97–116. Sauter Fritz, Varmuza Kurt, Werther Wolfgang, Stadler Peter 2002, Chemical Analysis of organic material found in traces on a neolithic terracotta idol statuette excavated in Lower Austria. *Studies in Organic Archaeometry V. ARKIVOC 2002 (i)* 54–60. <http://www.arkat-usa.org/ark/journal/2002/General/1-343E/343E.pdf>

STADLER Peter 2005?, Die Keramik der frühneolithischen Siedlung von Brunn am Gebirge, Flur Wolfholz, I. In Vorbereitung, ca. 120 Tafeln.

³⁵ NEUGEBAUER-MARESCHE Christine, NEUGEBAUER Johannes-Wolfgang 1997, Franzhausen, das frühbronzezeitliche Gräberfeld I. *FÖ Materialhefte A 5*. STADLER Peter 2001, Gegenwärtiger Stand der Auswertung der archäologischen und anthropologischen Daten aus dem frühbronzezeitlichen Gräberfeld Franzhausen I mithilfe der „Analyse der Nächsten Nachbarn“. *Mensch und Umwelt während des Neolithikums und der Frühbronzezeit in Mitteleuropa. Ergebnisse interdisziplinärer Archäologie, Klimatologie, Biologie und Medizin. Internationale Archäologie, Arbeitsgemeinschaft, Symposium, Tagung. Kongress, Band 2*, 257–270

³⁶ SAGE Walter 1984, Das Reihengräberfeld von Altenerding in Oberbayern. *Germanische Denkmäler der Völkerwanderungszeit A/14*. STADLER Peter 1997a, Auswertung der Perlen aus dem Reihengräberfeld von Altenerding in Bayern. In: Hrsg. Uta von Freeden und Alfred Wiczorek, *Archäologie, Techniken, Analysen. Akten des Internationalen Perlensymposiums in Mannheim vom 11. Bis 14 November 1994, Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte Band 1*, 161–168.

³⁷ ERDÉLYI István, OJTOZI Eszter, GENING Wladimir F. 1969, Das Gräberfeld von Newolino. *ArchHung* 46. Ein weiteres Buch zu Nevolino, mit neuen Grabungsergebnissen, die wir mitbenutzen konnten, ist von GOLDINA Rima D. in Vorbereitung.

hinzufügen, dass das keramische Material der Fundstelle III noch nicht vollständig in der Auswertung berücksichtigt wurde. Jedenfalls sind in Fundstelle I (ganz oben, Häuser 1–2) derartige Ornamente nicht aufgetreten.

In Tafel 3 sehen wir für Franzhausen I die Kartierung eines signifikanten Merkmals aus der Zoologie, nämlich die Fleischbeigabe, die natürlich nur als Knochen erhalten blieb, von bos. Sie konzentriert sich auf den ältesten Teil des Gräberfeldes mit Ausnahme einiger Ausreißer. Die Verteilung ist jedenfalls höchst signifikant.

Tafel 4 zeigt die Verteilung einer kleinen grünen Perle auf dem Gräberfeldplan von Altenerding. Obwohl die Perle eigentlich über das gesamte Areal verstreut erscheint, treten jeweils lokale Konzentrationen in vor allem benachbarten Gräbern auf, weshalb auch diese Verteilung als höchst signifikant einzustufen ist.

In Tafel 5 haben wir für das Gräberfeld von Nevolino einen charakteristischen Gürtelbeschlag mit pseudoschnallenförmigen Bronzebeschlägen ausgewählt. Das Vorkommen beschränkt sich auf zwei enge Bereiche des Gräberfeldes, und dort auf benachbarte Gräber. Auch diese Verteilung ist höchst signifikant.

Ergebnisse der Analyse der „N Nächsten Nachbarn bezüglich eines Typs“ (ANN1).

Bei der Siedlung von Brunn am Gebirge zeigt sich in Tafel 6 vor allem die Verwandtschaft benachbarter, zu einem Hausgrundriss gehöriger Gruben, aber auch der nebeneinander in Reihen liegenden und gleich orientierten Häuser. Selbstverständlich wäre es noch besser, das gesamte Fundmaterial aus der Siedlung zusammen auszuwerten, dazu müssen wir aber noch den Abschluss der Bearbeitung abwarten.

Die Gruppenbildung bei Franzhausen I in Tafel 7 lässt im ältesten Bereich des Gräberfeldes mehrere Gruppen erkennen, in dem Bereich, wo als Tierbeigaben bos und sus und als Gefäßform der Typ Gollnsdorf auftritt. Inwieweit hier durch die Analyse der N Nächsten Nachbarn tatsächlich eine Chronologie erhalten wird, bleibt noch abzuwarten und mit Hilfe der über 100 ¹⁴C-Daten, die an den Menschenknochen gemessen wurden, zu überprüfen.

Auch in Altenerding, siehe Tafel 8, wird eine Gruppenbildung erhalten, deren Signifikanz für die Chronologie noch nicht geklärt ist. Gerade bei Altenerding könnten noch einige tausend stratigrafische Beziehungen zwischen einander überlagernden oder störenden Gräbern untersucht werden, um hier zu mehr Klarheit zu gelangen.

Dagegen dürften im Falle des Gräberfeldes von Nevolino, siehe Tafel 9, tatsächlich chronologische Gruppen zu sehen sein, die vor allem eine Belegung entlang der oft recht langen Reihen nahe legen.

Um besser zu verstehen, was in der ANN1 eigentlich passiert, bzw. welche Relationen zwischen benachbarten Fundkomplexen gegeben sind, haben wir dieses Netzwerk der Beziehungen in den folgenden Abbildungen dargestellt: Für Brunn am Gebirge, Flur Wolfholz in Tafel 10, Franzhausen I in Tafel 11, Altenerding in Tafel 12 und Nevolino in Tafel 13.

Das Beispiel der Siedlung von Brunn am Gebirge zeigt in Tafel 10 einen Ausschnitt des Gesamtplanes vor allem mit den Beziehungen benachbarter Gruben von der Fundstelle II. Alle Beziehungen sind als Linien dargestellt, die Linienstärke entspricht der Anzahl der Beziehungen. Die meisten Beziehungen bestehen dabei zwischen Symbolen gleicher Form und Farbe, dann zwischen unterschiedlichen Symbolen in gleicher Farbe. Daneben existieren aber auch Beziehungen zwischen benachbarten unterschiedlichen Gruppen, sie sind aber viel weniger intensiv.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Analyse der N Nächsten Nachbarn nicht eine fertige Chronologie liefert, sondern nur eine Gruppenbildung. Manche dieser Gruppen können nun durchwegs zeitgleich mit anderen Gruppen sein, die abseits liegen. Somit darf man die ANN1 in der derzeitigen Form nur als eine Interpretationshilfe bei der Erstellung einer Chronologie betrachten.

2.1.1.4.2 Ergebnisse der Analyse der „N Nächsten Nachbarn mit zwei Typen“ (ANN2).

In einem weiteren Verfahren können die Verbreitungen unterschiedlicher Typen miteinander verglichen werden. Es können nun signifikant ähnliche Verteilungen erkannt werden. Dazu müssen die Vertreter des zweiten Typs signifikant häufiger als erwartet in der Umgebung der „N Nächsten Nachbarn“ des ersten Typs auftreten. Insgesamt müssen bei einer gegebenen Typenanzahl T, die gleich der Zahl der zu erzeugenden Karten ist,

$$V = \frac{T * (T - 1)}{2} \text{ Vergleiche (V) durchgeführt werden, d. h. z. B. bei } T=500,$$

$$V = \frac{500 * (500 - 1)}{2} = 124750 (!).^{38}$$

Daraus werden wieder Beziehungen zwischen benachbarten Fundkomplexen ermittelt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass – wenn eine unterschiedliche Ausstattung von gleichzeitigen Gräbern gegeben ist, wie das bei Männer- und Fraueninventaren im Allgemeinen der Fall ist, dennoch ihre Zusammengehörigkeit erkannt werden kann, wenn sie tatsächlich im Gräberfeld nebeneinander liegen.

³⁸ Auf einem PC mit Intel 80486 DX2 Prozessor mit 66MHz benötigte WinSerion für diesen Datensatz ca. 337 sec.

Gefahren beider Verfahren sind dadurch gegeben, dass bei der Wahl ungünstiger Parameter³⁹ zu große Gruppen gebildet werden. Dies kann durch die Wahl einer kleineren Umgebung der „N Nächsten Nachbarn“ vermieden werden, wenn so auch insgesamt wesentlich weniger signifikante Kartierungen erhalten werden.

Bei einer Gräberfeldauswertung können noch folgende Dinge eine Rolle spielen: Die Anordnung von Gräbern in Reihen kann bewirken, dass durch die geringeren Abstände zu den benachbarten Gräbern derselben Reihe, diese Reihen bevorzugt werden.⁴⁰ Dem kann man durch eine z-Transformation, also Normierung und Zentrierung⁴¹ der Koordinaten begegnen. Dadurch liegt nicht mehr eine Dominanz der Gräberreihen vor, die ja bei den Einzelkartierungen nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Sind Doppel- oder Mehrfachbelegungen eines Gräberfeldareals gegeben, kann man manuell oder unter Verwendung des einfachen Seriationsergebnisses diese „scheinbaren“ Beziehungen löschen. Dadurch sollte es möglich sein, auch unabhängige Gruppen aus demselben Areal aus verschiedenen Zeiten zu erhalten.

Sollen diese Doppel- oder Mehrfachbelegungen automatisch getrennt werden, so bieten sich zwei Möglichkeiten an:

1) Man verwendet die Ergebnisse der einfachen Seriation und verhindert das Verbinden von Komplexen, die zeitlich ganz anders liegen.

2) Viel einfacher ist es hingegen, eine Auswahlbedingung für das Aufstellen von Beziehungen vorzugeben: Nämlich, dass nur diese Beziehungen von Fundkomplexen für eine weitere Auswertung herangezogen werden dürfen, für die die Beziehung ergebenden Typen mindestens einmal im selben Fundkomplex gemeinsam auftreten. Dieser Weg wird hier beschritten.

Um das Verfahren zu beschleunigen, kann man den ersten Typ einer Vorselektion unterwerfen. D. h. es werden überhaupt nur solche Typen mit anderen verglichen, die für sich selbst in ihrer Verbreitung ebenfalls bereits signifikant sind.

In der Praxis zeigt sich, wenn die Signifikanz einer Beziehung nur in einer Richtung von einem Typ zum anderen untersucht wird, dass beträchtlich viele unerwünschte Beziehungen mit ausgewertet werden. Somit ist es notwendig, die Signifikanz zusätzlich in umgekehrter Richtung zu bestätigen. Die Resultate nenne ich „Signifikant gleiche Kartierungen mit reziproker Kontrolle“. Inzwischen hat sich jedoch gezeigt, dass bei richtiger Anwendung, die beiden Vergleichsarten zu gleichen Resultaten führen sollten.

Beispiele für die gemeinsame Kartierung zweier Typen.

In Tafel 14 sehen wir zwei keramische Merkmale zusammen kartiert. Zum einen die Fingertupfenleiste mit Knubben am größten Bauchdurchmesser, die auch zuvor als Einzelmerkmal dargestellt war, zusammen mit einer speziellen Bodenform. Dabei kann man erkennen, dass im Bereich von Fundstelle II (also ganz unten auf der Karte) ein gemeinsames Auftreten gegeben ist, während dieser Boden auch noch viel später auf der Fundstelle I allein vorkommt. Durch die zahlreichen Beziehungen im Bereich von Fundstelle II wird diese gemeinsame Kartierung als signifikant ausgewiesen.

Für Franzhausen I zeigen wir in Tafel 15 das gemeinsame Auftreten zweier sehr ähnlicher Typen von gelochtem, trapezförmigem Knochenschmuck mit unterschiedlich großen Bohrungen. Dabei sieht man das häufige Auftreten beider an der gleichen Kette im gleichen Grab. Diese Vorkommen sind in der Überlagerung von zwei Dreiecken als Sterne zu sehen.

Bei Altenerding sehen wir in Tafel 16 zwei Gürtelbeschlüge kartiert, die – wie es für das Gräberfeld charakteristisch ist – in unterschiedlichen Bereichen gemeinsam auftreten, auch auf gleichen Gürteln, was wieder durch die sternförmigen Symbole gekennzeichnet wird. Daneben gibt es aber das einzelne Auftreten der beiden Typen.

Für Nevolino wird in Tafel 17 das Auftreten eines Gürtelbeschlugs und eines Anhängers dargestellt, in vier Fällen durch einen Stern gekennzeichnet im gleichen Grab. Alle sind außerdem auf den südwestlichen Bereich des Gräberfeldes konzentriert.

Ergebnisse der Analyse der „N Nächsten Nachbarn bezüglich zweier Typen“ (ANN2).

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der ANN2 niemals ident mit denjenigen der ANN1 sind, aber dennoch kann in der Gruppenbildung eine große Ähnlichkeit festgestellt werden. Das zeigen für Brunn am Gebirge Wolfholz Tafel 18, für Franzhausen I Tafel 19, für Altenerding Tafel 20 und für Nevolino Tafel 21.

Um besser zu verstehen, was in der ANN2 eigentlich passiert, bzw. welche Relationen zwischen benachbarten Fundkomplexen ausgewertet werden, haben wir dieses Netzwerk der Beziehungen in den folgenden Abbildungen dargestellt: In Tafel 22 im Ausschnitt des Grabungsplanes für die Fundstelle II in Brunn am Gebirge Wolfholz. Die nächsten Tafeln zeigen weitere Netzdarstellungen, in Tafel 23 für Franzhausen I, in Tafel 24 für Altenerding und in Tafel 25 für Nevolino.

³⁹ So wurde z. B. bei der Auswertung von Kölked Feketekapu, KISS Attila 1996, bei einer Anzahl der „N Nächsten Nachbarn“, von 50 und einem Signifikanzniveau von 1 = 60% das Maximum signifikanter Verbreitungen mit 186 erreicht.

⁴⁰ Vor allem, wenn die Zahl der „Nächsten Nachbarn“ größer als 25 gewählt wird.

⁴¹ D. h., dass der Mittelwert und die Standardabweichung 1 wird.

2.1.1.4.3 Dynamische Typologie bei der Horizontalstratigrafie.

Unser Konzept der dynamischen Typologie wurde oben für Seriationsergebnisse formuliert⁴² und bedeutet Folgendes: Wenn ein Typ in einem Seriationsergebnis als Durchläufer erscheint, kann das mehrere Ursachen haben, unter anderem könnten hier Typen vermengt oder zu grob gefasst worden sein. Wenn sich Merkmale eines Typs im älteren signifikant von Merkmalen im jüngeren Bereich unterscheiden, so können durch Aufspaltung zwei neue Typen erhalten werden. Insgesamt führt dieses Verfahren zu einer Seriationsverbesserung.

Bei Kartierungen kann man die dynamische Typologie folgendermaßen formulieren: Zeigt die Kartierung eines Typs zwei oder mehrere unabhängige Gruppen und unterscheiden sich die Typenvertreter in diesen Gruppen signifikant – zumindest in einem Merkmal, so ist es gerechtfertigt, hier eine typologische Untergliederung vorzunehmen.

Somit ist die Heuristik der dynamischen Typologie – nicht nur bei allen Verfahren der Seriation, sondern auch bei der Kartierung – ein iterativer Prozess, der nach einigen Schritten zum Stillstand kommt, wenn kein weiterer Materialzuwachs gegeben ist.

2.1.1.4.4 Schema zur Vorbereitung und Durchführung der „Analyse der N Nächsten Nachbarn“ (=ANN).

Im Folgenden wollen wir die Punkte zusammenfassen, die zur Vorbereitung und dann auch zur Durchführung der Analyse der N Nächsten Nachbarn notwendig sind.

Texttabelle 7, Schema für ANN

- Erstellung einer AutoCad-Zeichnung des Gräberfeldplanes oder der Europakarte.
- 2 Möglichkeiten.
- a) Datenbank mit WinSerion.
 - Typenkatalog mit Abbildungen.
 - Typenkatalog als File.
- b) besser Bilddatenbank Montelius, wobei Typenkatalog mit Abbildungen und Typenkatalog als File in Montelius implementiert sind.
- Kartierungen:
 - auf dem Bildschirm.
 - ausgedruckt auf Postscript-Drucker⁴³ oder mit Ghostscript⁴⁴ auf jedem Drucker.
 - direkt verwendbar als Offsetvorlagen für den Druck,
 - oder Einsatz der Postscript-Files direkt in der Druckerei.
- Dynamische Typologie durch Gegenüberstellung von Typologie und Kartierung
- Eigentliche Auswertung
- Statistischer Test auf Zufälligkeit:
 - für alle Vertreter eines Typs in ihren Fundkomplexen wird ermittelt, ob dieser Typ in einer Umgebung der N Nächsten Nachbarn dieser Fundkomplexe signifikant häufiger auftritt als es dem Zufall entspricht = **Analyse der N Nächsten Nachbarn bezüglich eines Typs (oder Merkmals)**
 - für jeden Vertreter eines Typs in einem Komplex wird ermittelt, ob ein anderer Typ in der Umgebung der N Nächsten Nachbarn signifikant häufiger auftritt als es dem Zufall entspricht = **Analyse der N Nächsten Nachbarn bezüglich zweier Typen (oder Merkmale)**
- Für alle Kartierungen, die den Test erfolgreich bestehen ==> Erstellung einer Liste der Relationen zwischen benachbarten Fundkomplexen
- Auswertung all dieser Relationen über Seriation (Reciprocal Averaging)
- Clusteranalyse der dabei erhaltenen Eigenvektoren liefert „natürliche“ Gruppen
- Kartierung dieser Gruppen auf dem Gräberfeldplan
- Interpretation

⁴² STADLER Peter 1985b, Die Seriation awarischer Gürtelgarnituren. Masch. Diss. Wien, 52–54, aber auch in diesem Buch, siehe Seite 27.

⁴³ Postscript hat sich zur Standardsprache für Vektorgrafiken in Zusammenhang mit Druckereien entwickelt. Sie wurde entwickelt von der Firma Adobe, Homepage: <http://www.adobe.com/>

⁴⁴ Ghostscript und GhostView sind frei erhältliche Programme zur Darstellung von Postscript-Files. Ihre Homepage befindet sich hier: <http://www.cs.wisc.edu/~ghost/>. Ghostview ist dabei die Windows-Oberfläche, mit deren Hilfe die Grafiken mittels GhostView erstellt werden.

2.2 ^{14}C -Methode, Theorie und Praxis.

Seit der Entdeckung der ^{14}C -Uhr wurde die Datierung und damit die Absolutchronologie der Urgeschichte der Welt ziemlich stark verändert. Colin Renfrew⁴⁵ nannte es die „*radiocarbon revolution*“. Die Datierung mit ^{14}C war für die Archäologie eine der bedeutendsten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts.

Die Radiocarbon-Methode wurde von einem Team um Prof. Willard F. Libby von der Universität Chicago unmittelbar nach dem zweiten Weltkrieg entwickelt.⁴⁶ Libby erhielt dafür 1960 den Nobelpreis für Chemie „für seine Methode, um Carbon-14 für Altersbestimmungen in Archäologie, Geologie, Geophysik und anderen Wissenschaften zu nützen“. Nach einem der Wissenschaftler,⁴⁷ die Libby für den Nobelpreis nominierten, „hat selten eine einzige Entdeckung in der Chemie so großen Einfluss auf das Denken in so vielen Bereichen der menschlichen Entwicklung genommen. Selten hat eine einzige Entdeckung so weites öffentliches Interesse erfahren.“

Heute arbeiten über 130 ^{14}C -Labors auf der ganzen Welt. Die ^{14}C -Technik wurde und wird in vielen verschiedenen Wissenschaftsbereichen verwendet, unter anderen in der Hydrologie, Wissenschaft von der Atmosphäre, Ozeanographie, Geologie, Paläoklimatologie, Archäologie und Biomedizin.

2.2.1 Grundlagen der ^{14}C -Methode (Walter Kutschera).

In der Natur kommt Kohlenstoff in Form von 3 Isotopen vor – ^{12}C , ^{13}C , die beide stabil sind, und ^{14}C , das instabil oder radioaktiv ist. Diese Isotope kommen in sehr unterschiedlichen Mengen vor: $^{12}\text{C} = 98.89\%$, $^{13}\text{C} = 1.11\%$ und $^{14}\text{C} = 0.000000001 (=10^{-10}) \%$. Somit kommt ein ^{14}C -Atom in der Natur auf **1.000.000.000.000 ($=10^{12}$)** ^{12}C -Atome. Die Radiocarbon-Methode basiert auf der Zerfallsrate des radioaktiven ^{14}C , das in der oberen Atmosphäre in der Höhenstrahlung durch den Einfluss von Neutronen auf ^{14}N (Stickstoff) gebildet wird. Die Reaktionsgleichung sieht folgendermaßen aus: $^{14}\text{N} + n \Rightarrow ^{14}\text{C} + p$ (n bedeutet ein Neutron und p ein Proton).

Das so gebildete ^{14}C wird zunächst zu ^{14}CO und dann zu $^{14}\text{CO}_2$ oxidiert und tritt in den Lebenszyklus der Pflanzen durch Photosynthese und der Tiere und Menschen durch die Nahrungskette ein (siehe Tafel 26). Die gleichmäßige Verteilung von $^{14}\text{CO}_2$ in der Atmosphäre konnte durch den Überschuss des in Atombombenversuchen erzeugten ^{14}C demonstriert werden.⁴⁸ Pflanzen und Tiere nehmen während ihres Lebens ^{14}C auf und stehen damit im physikalischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre, das bedeutet, dass das Verhältnis von stabilem zu instabilem Kohlenstoff annähernd gleich bleibt. Sobald Pflanze oder Tier sterben, wird kein weiterer Kohlenstoff aufgenommen und auch kein weiterer radioaktiver Kohlenstoff, wobei letzterer durch den radioaktiven Zerfall nun stetig abnimmt. Libby, Anderson und Arnold⁴⁹ entdeckten, dass dieser Zerfall in einer konstanten Rate erfolgt. Sie fanden heraus, dass nach 5668 Jahren die Hälfte des ^{14}C der ursprünglichen Probe zerfallen und dass nach weiteren 5668 Jahren nur mehr ein Viertel vorhanden sein wird. Später wurde der Wert dieser Größe, die man als Halbwertszeit bezeichnet, zu 5730 ± 40 Jahre bestimmt.⁵⁰ Nach zehn Halbwertszeiten (d.h. 57.300 Jahren) ist der Gehalt von ^{14}C bereits auf ein Tausendstel seines ursprünglichen Wertes gesunken. Somit sind Datierungen von Proben mit einem Alter über 50.000 Jahren kaum mehr durchführbar.

Misst man nun die radioaktiven Zerfälle in einer Probe und vergleicht die Aktivität mit einer Probe von heute (dazu nimmt man Holz von 1890, dessen Aktivität für 1950 korrigiert wurde), so kann man daraus das Alter der Probe – also den Todeszeitpunkt des Lebewesens – bestimmen.

Der Zerfall von ^{14}C erfolgt nach folgender Gleichung: $^{14}\text{C} \Rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu_e$ (e^- ist dabei ein Beta-Teilchen oder Elektron, ν_e ein Anti-Elektron-Neutrino)

Da die Anzahl der produzierten Beta-Teilchen genau der Zahl der zerfallenden ^{14}C -Atome entspricht, kann man ihre Zählung dazu heranziehen, auf die ^{14}C -Konzentration in der Probe zu schließen.

Diese Messung der zerfallenden ^{14}C -Atome hat mehrere Nachteile, da wegen der sehr langen Halbwertszeit nur ein winziger Teil der in einer Probe vorhandenen ^{14}C -Atome in akzeptablen Messzeiten zerfallen:

- Es werden große Probenmengen benötigt (mehrere Gramm Kohlenstoff).
- Die Messzeiten dauern für eine Probe oft über eine Woche.

⁴⁵ RENFREW Colin 1973, Before Civilization. The radiocarbon revolution and Prehistoric Europe, London 1973, 292p

⁴⁶ LIBBY W. F. 1946, Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation, Phys. Rev. 69, 671–672.

⁴⁷ TAYLOR R. E. 1987, Radiocarbon Dating. An Archaeological Perspective, Academic Press, Orlando, USA.

⁴⁸ LEVIN I., HESSHAIMER V. 2000, Radiocarbon – a unique tracer of global carbon cycle dynamics, Radiocarbon 42/1, 69–80.

⁴⁹ ANDERSON E. C., LIBBY W. F., WEINHOUSE S., REID A. F., KIRSHENBAUM A. D., GROSSE A. V. 1947, Natural radiocarbon from Cosmic Radiation, Phys. Rev. 72, 931–936.

⁵⁰ GODWIN H. 1962, Half-life of radiocarbon, Nature 195, 984.

Verwendet man dagegen die Methode der Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS = Accelerator Mass Spectrometry), so werden nicht die Zerfälle, sondern die ^{14}C -Atome direkt gemessen, was zu einer enormen Steigerung der Nachweiswahrscheinlichkeit führt.

Die Vorteile dieser Methode sind:

- kleine Probemengen im 1–10 mg Bereich.
- Die Messzeiten liegen im Bereich von einer halben bis ganzen Stunde.

2.2.2 Kalibration.

Lange nachdem Libby seine Methode entwickelt hatte, bemerkte man vor allem durch Datierung der Jahresringe von bis zu 7000 Jahre alten Borstenzapfkiefern, dass die von ihm ursprünglich getroffene (und rein willkürliche) Annahme, die ^{14}C Konzentration sei im Lauf der Zeit konstant geblieben, nicht zutrifft. Das ^{14}C -Alter war vor allem für mehr als 2000 Jahre alte Jahresringe (durch Abzählen absolut datiert) deutlich zu gering. Im Allgemeinen kann man sagen, dass das ^{14}C -Alter – je älter die Proben sind – umso stärker vom tatsächlichen Alter in Richtung zu einem zu jungen Alter abweicht. Also suchte man nach einer Möglichkeit, das unkalibrierte ^{14}C -Alter mit Hilfe einer rein mathematischen Kalibration auf das richtige Alter umzurechnen.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden mehrere – immer genauere – Kalibrationskurven ermittelt,⁵¹ die es einem nun unter Verwendung von Kalibrationsprogrammen ermöglichen, aus dem unkalibrierten ^{14}C -Alter ein kalibriertes Datum zu erhalten. Proben mit einem unkalibrierten ^{14}C -Alter von 6500 Jahren BP (BP = Before Present = 1950 AD), also 4550 vor Chr., werden durch die Kalibration um bis zu 800–1000 Jahre älter. Leider enthalten die Kalibrationskurven zahlreiche „wiggles“, also mehrdeutige Stellen,⁵² weshalb im ungünstigen Fall das Datierungsintervall wesentlich höher werden kann, als das beim unkalibrierten ^{14}C -Alter der Fall ist. Letzteres enthält im Wesentlichen nur die Unsicherheiten der ^{14}C -Messung, während das kalibrierte Alter auch die natürlichen Schwankungen des ^{14}C -Gehalts widerspiegelt.

Im Internet kann man derzeit mehrere Programme zur Kalibration erhalten. Genannt sei beispielsweise OxCal (derzeit Version 3.9) entwickelt von Ch. Ramsey-Bronk,⁵³ einem Physiker aus Oxford. Es ist das derzeit am weitesten fortgeschrittene und gleichzeitig benutzerfreundlichste Programm.

2.2.3 Auswahl der ^{14}C -Proben nach dem Material.

In unserem ^{14}C -Projekt (siehe Seite 44) sollten möglichst viele Daten erfasst werden. Bei Serienanalysen kann man mit statistischer Wahrscheinlichkeit bei der Untersuchung von Holzkohlen Althölzer erkennen. D. h. so genannte kurzlebige Probenmaterialien, z. B. die Früchte einjähriger Pflanzen, standen nicht im Mittelpunkt dieses Projektes, hier ist außerdem die Anzahl vorhandener Proben zu gering, doch wo sie vorlagen, wurden sie selbstverständlich berücksichtigt.

Neben Holzkohlen wurden Tierknochen aber auch Menschenknochen untersucht. Hier boten sich geradezu einzigartig die reichen Sammlungen der Paläozoologischen aber auch Anthropologischen Abteilung des Naturhistorischen Museums an. Von den 35000 menschlichen Skeletten, die hier inventarisiert sind, konnten einige, aus beigabenreichen Gräbern stammende Proben archäologisch gut eingeordnet werden.

2.2.4 Das AMS-Zentrum VERA: Vienna Environmental Research Accelerator.

VERA ist ein Zentrum für Accelerator Massenspektrometrie (AMS), das 1996 am Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien in Betrieb genommen wurde.⁵⁴ Der Name der Anlage, Vienna Environmental Research Accelerator (VERA), zeigt deren primäres Ziel an, umfassende Umweltforschungen zu betreiben. Die AMS-Methode ist für diese Aufgabe gut geeignet durch die Fähigkeit, langlebige natürliche und künstliche Radionuklide in den sieben Hauptbereichen unserer Umwelt zu verfolgen: Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre, Kosmosphäre und Technosphäre.

Die VERA-Anlage, die auf einem 3-Millionen-Volt Pelletron Tandem Beschleuniger basiert, befindet sich nahe den Physikalischen Instituten der Universität Wien, im so genannten „Kavalierstrakt“ in der Währingerstrasse 17, A-1090 Wien. Das Gebäude ist ein zweistöckiges Palais aus dem letzten Jahrhundert, das unter Denkmalschutz steht. Das Innere des Kavalierstraktes wurde komplett umgebaut, um ein modernes Labor für AMS zu schaffen. Gleichzeitig wurde versucht, möglichst viel von der originalen Bausubstanz des Gebäudes zu erhalten. Tafel 27

⁵¹ STUIVER M., REIMER P. J., BARD E., BECK J. W., BURR G. S., HUGHEN K. A., KROMER B., McCORMAC G., VAN DER PLICHT J., SPURK M. 1998, INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP, Radiocarbon 40/3, 1041–1083.

⁵² siehe STUIVER et al.

⁵³ OxCal kann hier herunter geladen werden: <http://www.rlaha.ox.ac.uk/orau/oxcal.html>. Siehe zuletzt dazu Bronk Ramsey Christopher 2001, Development of the Radiocarbon Program OxCal, Radiocarbon, 43 (2A) 355–363.

⁵⁴ KUTSCHERA W., COLLON P., FRIEDMANN H., GOLSER R., HILLE P., PRILLER A., ROM W., STEIER P., TAGESSEN S., WALLNER A., WILD E., WINKLER G. 1997, VERA: A new AMS facility in Vienna, Nucl. Instr. and Meth. B 123, 47–50.

und Tafel 28 zeigen den Grundriss des Kavaliertraktes in zwei Geschossen. Der gesamte zur Verfügung stehende Raum ($\sim 600 \text{ m}^2$) wurde in vier annähernd gleich große Bereiche untergliedert: Beschleuniger, Werkstätten, Probenaufbereitung und Büroräume, einschließlich eines Seminarraumes. Für die S-förmige Beschleunigeranlage wurde Platz geschaffen, indem die Wände zwischen nebeneinander liegenden Räumen entfernt wurden. Ein zusätzliches „beamline System“ (hauptsächlich für die Detektion von Schweren Isotopen) wurde später nachgerüstet (siehe unten). Ein relativ großer Teil des Raumes wurde für die Probenaufbereitung vorgesehen, unter Nutzung der Erfahrung aus anderen AMS-Labors, in denen sich diese bald als Engpass bei der Effizienz des Probendurchsatzes herausgestellt hatte. Der Umbau und die Neueinrichtung der Räume wurden 1995 abgeschlossen.

Die VERA AMS Anlage wurde 1994 von National Electrostatics Corporation (NEC) in Wisconsin, USA, bestellt, mit Gesamtkosten in der Höhe von ungefähr zwei Millionen Dollar. Die Anlage kam im Herbst 1995 in Wien an und bestand die technischen Überprüfungen bei Testläufen im März 1996. Seit dieser Zeit ist die Anlage für ^{14}C -Messungen im Betrieb.⁵⁵ In den folgenden Jahren wurde VERA in einen voll computerisierten Zustand für ^{14}C -Messungen und andere langlebige Radionuklide gebracht.⁵⁶

Wie weiter oben angeführt wurde, ist die AMS-Methode gut geeignet für die Aufgabe, langlebige natürliche und künstliche Radionuklide in der Atmosphäre, Biosphäre (lebende Materie), Hydrosphäre (Regen, Flüsse, Seen, Grundwasser und Meere), Kryosphäre (Polare Eiskappen und Gletscher), Lithosphäre (fester Teil der Erdoberfläche), Kosmosphäre (extraterrestrisches Material) und Technosphäre (vom Menschen geschaffene Dinge) zu messen. Alle diese Sphären haben mehr oder weniger Einfluss auf unsere Umwelt, z. B. das Klima.⁵⁷ Eine Übersicht über die vielfältige Verwendung langlebiger Radionuklide in den sieben Sphären unserer Umwelt ist in Tabelle 1, Seite 219 gegeben.

Langlebige Radionuklide sind für Fragen der Umweltforschung nützlich, da viele von ihnen durch Einwirkung von Höhenstrahlung in der Atmosphäre entstehen⁵⁸ und so als „tracer“ für die verschiedenen Wege, die die oben erwähnten Domänen verbinden, verwendet werden können. In den meisten Fällen jedoch können sie nicht auf natürlichem Niveau durch die Zählung der radioaktiven Zerfälle gemessen werden, teilweise wegen der kleinen Probenmengen im Milligramm-Bereich, die im Allgemeinen nur kleine Zahlen von Radionukliden enthalten (10^5 bis 10^8). Dies ergibt einfach zu wenige Zerfälle in vernünftigen Messzeiten. Mit AMS werden die Radionuklide durch direktes Zählen der Atome ermittelt statt durch Beobachtung der seltenen Zerfälle. Das ermöglicht es, wichtige Radionuklide wie ^{10}Be ($t_{1/2} = 1.6 \times 10^6 \text{ a}$), ^{14}C (5730 a), ^{26}Al ($7.2 \times 10^5 \text{ a}$), ^{36}Cl ($3.01 \times 10^5 \text{ a}$), ^{41}Ca ($1.04 \times 10^5 \text{ a}$), ^{129}I ($1.6 \times 10^7 \text{ a}$), in vielen terrestrischen und extraterrestrischen Materialien zu untersuchen.⁵⁹ Quantitative Resultate werden erhalten, indem man die extrem kleinen Verhältnisse von seltenen Radioisotopen zu stabilen Isotopen bestimmt, die im Bereich von 10^{-10} bis 10^{-16} liegen.

Künstliche Radionuklide sind auch als „tracer“ in der Umwelt von Bedeutung, speziell in den Fällen, in denen die Anfangsbedingungen (Menge, Ort und Zeit) besonders gut bekannt sind. Ein Beispiel ist die projektierte Benutzung von ^{129}I als ozeanischen „tracer“, der bei der nuklearen Wiederaufbereitung freigesetzt wird.⁶⁰ Die Konzentration von künstlichen Radionukliden kann viele Größenordnungen über den natürlichen Werten liegen, was einem erlaubt, Umweltprozesse über einen weiten dynamischen Bereich zu studieren.

2.2.5 ^{14}C -Messungen.

Das Herz der VERA-Anlage ist das AMS-System von National Electrostatics Corporation (NEC) in Wisconsin, USA. Tafel 29 zeigt das ursprüngliche System mit Kurzbeschreibung seiner Hauptbestandteile, wie es von 1996 bis 2000 betrieben wurde. Die folgende Tafel 30 zeigt das erweiterte AMS-System, das nun erlaubt, Radionuklide über den gesamten Massenbereich der Nuklide (^{10}Be bis ^{244}Pu) zu untersuchen.⁶¹

Proben (typischerweise ein paar Milligramm Material), deren Radionuklidgehalt gemessen werden soll, werden in einer Cäsium-Strahl „sputter source“ geladen, die normalerweise 40 Proben aufnehmen kann. Für ^{14}C -Messungen ist das Probenmaterial fester Kohlenstoff vermischt mit dem Katalysator, der im Graphitisierungsprozess benutzt wurde (siehe Probenaufbereitung Seite 42). Negative Ionen von Kohlenstoff, C⁻, werden von der Quelle extrahiert, auf etwa 70 keV vorbeschleunigt und gemäß ihrer Energie in einem elektrostatischen Analysator selektiert. Dann passieren sie einen hochauflösenden Injektor-Magneten zu einer ersten Massenanalyse. Die Vakuumkammer des

⁵⁵ PRILLER A., GOLSER R., HILLE P., KUTSCHERA W., ROM W., STEIER P., WALLNER A., WILD E. 1997, First performance tests of VERA, Nucl. Instr. and Meth. B 123, 193–198.

⁵⁶ STEIER P., PUCHEGGER S., GOLSER R., KUTSCHERA W., PRILLER A., ROM W., WALLNER A., WILD E. 2000, Developments towards a fully automated AMS system, Nucl. Instr. and Meth. B 161–163, 250–254.

⁵⁷ GRAEDEL T. E., CRUTZEN P. J. 1994, Chemie der Atmosphäre, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg.

⁵⁸ LAL D., PETERS B. 1967, Cosmic Ray Produced Radioactivity on Earth, In: Handbuch der Physik, K. Sitte, ed., Vol. 46/2, Springer Verl. Berlin, 1967, 551ff.

⁵⁹ ELMORE D., PHILLIPS F. M. 1987, Accelerator Mass Spectrometry for Measurement of Long-lived Radioisotopes, Science 236, 543–550. KUTSCHERA Walter 1993, Accelerator Mass Spectrometry. Counting Atoms Rather Than Decays, Nucl. Phys. News 3/1, 15–21.

⁶⁰ YIOU F., RAISBECK G. M., ZHOU Z. Q., KILIUS L. R. 1994, ^{129}I from nuclear reprocessing, potential as an oceanographic tracer, Nucl. Instr. and Meth. B 92, 436–439.

⁶¹ VOCKENHUBER C., AHMAD I., GOLSER R., KUTSCHERA W., LIECHTENSTEIN V., PRILLER A., STEIER P., WINKLER S. 2003, Accelerator mass spectrometry of heavy long-lived radionuclides, Int. J. Mass Spectrom. 223–224, 713–732.

Magneten ist elektrisch isoliert und kann in kurzer Folge (im Bereich von Millisekunden) mit Spannungen in solcher Weise versehen werden, dass den verschiedenen Kohlenstoffisotopen $^{12}\text{C}^-$, $^{13}\text{C}^-$ and $^{14}\text{C}^-$ Energien zugeführt werden, die ihnen die gleiche magnetische Steifheit vermitteln. Das bedeutet, dass alle drei Kohlenstoffisotope in schneller Folge in das Beschleunigersystem injiziert werden können. Dies trägt zur Gesamt-Präzision der Messung von Isotopenverhältnissen bei, indem kleine, begrenzte Instabilitäten des Systems ausgeglichen werden. Bewegliche „offset Faraday cups“ kontrollieren den Ionenstrom der stabilen Isotope $^{12}\text{C}^-$ und $^{13}\text{C}^-$ am Ausgang des Injektormagneten, wann immer das Radionuklid $^{14}\text{C}^-$ in den Beschleuniger gesandt wird (siehe Tafel 30).

Die negativen Ionen werden zum „terminal“ des Tandem-Beschleunigers beschleunigt, der bei einer positiven Spannung von bis zu 3 Millionen Volt (MV) arbeiten kann. Am „terminal“ passieren die Ionen einen Gaskanal oder eine dünne Folie, wo ihnen mehrere Elektronen entrissen werden. Die Ionen ändern deshalb ihre Ladung von negativ nach positiv und werden so nochmals durch die positive Terminal-Spannung beschleunigt (=Tandem Prinzip). Eine wichtige Funktion des „stripper“ ist die Zerlegung von $^{12}\text{CH}_2^-$ und $^{13}\text{CH}^-$ Ionenmolekülen, die in den Beschleuniger zusammen mit $^{14}\text{C}^-$ injiziert werden, aber mit Milliarden Mal höheren Intensitäten als $^{14}\text{C}^-$. Zum Glück bildet Stickstoff keine stabilen negativen Ionen. Deshalb fehlt der sonst überwältigende Hintergrund von $^{14}\text{N}^-$ völlig (78% in der Atmosphäre sind Stickstoff!). Die Zerstörung der Kohlenwasserstoffmoleküle wird erreicht, indem eine ausreichend große Anzahl von Elektronen entrissen wird, sodass die Molekülbindungen aufgebrochen werden. Schon früh in der Entwicklung der AMS hatte man erkannt, dass die Auswahl von $^{14}\text{C}^{3+}$ Ionen eine Molekülsplattung garantiert. Für eine hohe Ausbeute an dreifach positiv geladenen Ionen im stripping Prozess, ist eine „terminal“ Spannung zwischen 2 und 3 MV notwendig. Bei der VERA AMS-Anlage wird für ^{14}C -Messungen eine Spannung von 2.7 MV erzeugt. Neueste Entwicklungen an der ETH Zürich haben allerdings gezeigt, dass auch bei deutlich niedriger Terminalspannung von 0.5 MV und Strippen zum 1+ Zustand $^{12}\text{CH}_2$ und ^{13}CH Moleküle zerstört werden, wenn die Stripperdicke entsprechend erhöht wird.⁶² Dies öffnet die Möglichkeit für drastisch reduzierte Dimensionen einer ^{14}C AMS-Anlage.

Der Hochenergiemagnet auf der Analyseseite von VERA wird so eingestellt, dass er die $^{14}\text{C}^{3+}$ Ionen auf ihrer zentralen Flugbahn auswählt und die meisten Molekülzerfallsprodukte entfernt. Die stabilen Kohlenstoffisotope $^{12}\text{C}^{3+}$ and $^{13}\text{C}^{3+}$ werden stärker abgelenkt und in „offset Faraday cups“ durch Ionenstrommessungen registriert. Die $^{14}\text{C}^{3+}$ Ionen werden weiter transportiert und von den restlichen Molekülfragmenten durch einen elektrostatischen Analysator (früher Wien-Filter) gereinigt, welcher Ionen von bestimmter Energie (Geschwindigkeit) durchlässt. Nach dieser letzten Reinigung werden die $^{14}\text{C}^{3+}$ Ionen in einem Silizium-Detektor gestoppt, von dem die Gesamtenergie und die Zählrate gemessen werden. $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ und $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ Verhältnisse werden durch Vergleich der ^{14}C -Zählrate mit den Ionenströmen für $^{12}\text{C}^{3+}$ and $^{13}\text{C}^{3+}$ Ionen gemessen, die in den „offset Faraday cups“ am Ausgang des Hochenergiemagneten bestimmt werden. Für eine zuverlässige Bestimmung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses (typischerweise im Bereich von 10^{-12} bis 10^{-14}) werden diese Messungen relativ zu Kalibrationsproben mit präzise bekannten $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnissen durchgeführt, die zusammen mit den unbekanntenen Proben in die Ionenquelle geladen werden. Der gesamte Prozess der AMS-Anlage wird computergesteuert und die Messungen des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ Verhältnis können mit einer Präzision von 0.5% auf einer Routine-Basis durchgeführt werden. In Spezialfällen, vorausgesetzt, dass genug Zeit und Material für Mehrfachmessungen vorhanden sind, kann eine höhere Präzision bis zu 0.2% erreicht werden.⁶³

Das Prinzip der AMS-Messungen, das oben für ^{14}C beschrieben wurde, kann für viele Radionuklide angewandt werden. Eine wichtige Eigenschaft für einen relativ einfachen Nachweis ist jedoch die Instabilität der negativen Ionen von bestimmten stabilen Isobaren. Wie oben erwähnt bildet $^{14}\text{N}^-$ keine stabilen negativen Ionen und stört die ^{14}C Messung nicht. Der relative Massenunterschied zwischen ^{14}N und ^{14}C wäre bei weitem zu klein (10^{-5}) um eine Massenaufftrennung im Analyse magneten zu erlauben. Das gilt für jedes Isobaren-Paar (Radionuklid – Stabiles Nuklid), da beide zusammen am letzten Detektorsystem ankommen würden. Ohne diese spezielle Unterdrückung durch Nicht-Bildung von negativen Ionen, wäre die Störung durch stabile Isobare sehr hoch. Zum Glück wird die Detektion von zwei anderen wichtigen Radionukliden, ^{26}Al und ^{129}I , dadurch ziemlich erleichtert, dass $^{26}\text{Mg}^-$ and $^{129}\text{Xe}^-$ nicht existieren. Für ^{10}Be , das für VERA von Interesse ist, das jedoch durch einen starken isobaren Untergrund von stabilem ^{10}B gestört würde, können andere Trennmöglichkeiten benutzt werden.⁶⁴ Es wird bei VERA in einem der größeren technischen Entwicklungsprogramme angestrebt, neue Techniken zu entwickeln, um das Problem der Auftrennung von Isobaren für bisher wenig benutzte Radionuklide zu lösen.

Die Ablenkungskräfte der magnetischen Elemente von VERA wurden so gewählt, dass sogar die schwersten langlebigen Radionuklide ($^{244}\text{Pu}^{5+}$ Ionen), die von Interesse sind, transportiert werden können. Es wurde nachgewiesen,⁶⁵ dass Aktiniden gut bei Energien gemessen werden können, wie sie auch bei VERA zur Verfügung

⁶² SYNAL H.-A., JACOB S., SUTER M. 2000, The PSI/ETH small radiocarbon dating system, Nucl. Instr. and Meth. B 172, 1–7.

⁶³ STEIER P., DELLINGER F., KUTSCHERA W., ROM W., WILD E. M. 2004, Pushing the precision limit of ^{14}C measurements with AMS, Proceedings of the 18th International Conference on Radiocarbon, Wellington, New Zealand, 1–5 September 2003, to be published in Radiocarbon.

⁶⁴ RAISBECK G. M. YIOU F., BOURLES D., LESTRINGUEZ J., DEBOFFLE D., 1987, Measurements of ^{10}Be and ^{26}Al with a Tandetron AMS facility, Nucl. Instr. and Meth. B 29, 22–26

⁶⁵ FIFIELD L. K., CRESSWELL R. G., DI TADA M. L., OPHEL T. R., DAY J. P., CLACHER A. P., KING S. J., PRIEST N. D. 1996, Accelerator Mass Spectrometry of Plutonium Isotopes. Nucl. Instr. and Meth. B 117, 295–303.

stehen, unter Benutzung spezieller Detektorsysteme für diese schweren Ionen. Dies wurde auch vor kurzem für Messungen von ^{182}Hf , ^{210}Pb , ^{236}U und ^{244}Pu bei VERA bestätigt.⁶⁶

Obwohl das primäre Ziel von VERA Umweltforschung ist, bietet die AMS-Technik auch Möglichkeiten auf anderen Gebieten wie in der biomedizinischen Forschung.⁶⁷ So wurden bereits Projekte für gerichtsmedizinische Untersuchungen⁶⁸ und mit ^{14}C -markierten Substanzen in der Krebsforschung⁶⁹ durchgeführt.

2.2.6 Messung stabiler Isotope.

Um ein korrektes ^{14}C -Alter zu ermitteln, ist es ganz wichtig, das Verhältnis der stabilen Kohlenstoffisotope $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ für das Material zu kennen, das datiert werden soll. Diese Messung liefert die notwendige Information, um Massenfraktionierungseffekte für ^{14}C in Hinsicht zu ^{12}C zu korrigieren, die wegen massenabhängiger Prozesse auf den verschiedenen Wegen des Kohlenstoffs auftreten können. Die Massenfraktionierung wird durch den $\delta^{13}\text{C}$ -Wert charakterisiert, der folgendermaßen definiert ist:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{Probe}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{PDB-Standard}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{PDB-Standard}}} \right)$$

und gewöhnlich in Promille ausgedrückt wird (‰).

Für Datierungszwecke bedeutet Massenfraktionierung, dass Materialien mit dem gleichen Alter, die aus dem gleichen ^{14}C Reservoir stammen, unterschiedliche Altersbestimmungen ergeben können, wenn nicht für unterschiedliche Massenfraktionierung korrigiert würde. C3 Pflanzen z. B. (95% aller Pflanzen auf der Erde) erreichen $\delta^{13}\text{C}$ Werte zwischen -31 und -24‰, wogegen C4 Pflanzen (z. B. Zuckerrohr und Mais) $\delta^{13}\text{C}$ Werte zwischen -15 und -10‰⁷⁰ aufweisen. Im Allgemeinen variieren die $\delta^{13}\text{C}$ Werte zwischen 0 und -30‰, was doppelt so hohe Variationen für das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ Verhältnis bedeutet. Letztere Variation (6‰ für $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$) entspricht einem Altersunterschied von 500 Jahren.⁷¹

Über die Notwendigkeit hinaus, Korrekturen für eine genaue Altersbestimmung anzubringen, kann $\delta^{13}\text{C}$ dazu beitragen, den Ursprung des zu datierenden Probenmaterials zu identifizieren. Im Allgemeinen können Hochpräzisionsmessungen von stabilen Isotopenverhältnissen überall als Fingerabdruck von Umweltprozessen gelesen werden und auch bei der Lösung komplexer Datierungsprobleme ziemlich nützlich sein. Z. B. helfen neben $\delta^{13}\text{C}$ auch $\delta^{15}\text{N}$ Messungen, Knochenmaterial zu identifizieren, das geeignet für ^{14}C -Datierung ist, denn Knochenkollagen enthält Stickstoff in Form einer Vielzahl von Aminosäuren.

Das oben Gesagte macht deutlich, dass man für eine qualitativ hochwertige ^{14}C -Datierung die Fähigkeiten zur Hochpräzisionsmessung stabiler Isotopenverhältnisse benötigt. Die notwendige Präzision (im Bereich von 0.01‰) kann man am besten mit kommerziell erhältlichen Massenspektrometern für stabile Isotope erzielen.

2.2.7 Probenpräparation von organischen Proben für die ^{14}C -Datierung. (Eva Maria Wild)

Für eine qualitativ hochwertige ^{14}C -Datierung einer Probe ist eine sorgfältige und genaue Probenaufbereitung ebenso entscheidend wie die genaue Messung der Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse in probenspezifischen Substanzen. Die Aufgabe der Probenpräparation für die Radiokohlenstoffmethode besteht aus zwei Punkten:

- einer effektiven Reinigung der Probe und
- der Konvertierung des Probenkohlenstoffes in eine Form, die eine präzise ^{14}C -Messung ermöglicht.

⁶⁶ VOCKENHUBER et al. 2003.

⁶⁷ VOGEL J. S., TURTELTAUB K. W. 1994, Accelerator mass spectrometry in biomedical research, Nucl. Instr. and Meth. B 92, 445-453.

⁶⁸ WILD E. M., ARLAMOVSKI K. A., GOLSER R., KUTSCHERA W., PRILLER A., PUCHEGGER S., ROM W., STEIER P., Vycudilik W. 2000, ^{14}C dating with the bomb peak: An application to forensic medicine, Nucl. Instr. and Meth. B 172, 944-950.

⁶⁹ GARNER R. C., LIGHTFOOT T. J., CUPID B. C., RUSSEL D., COXHEAD J. M., KUTSCHERA W., PRILLER A., ROM W., STEIER P., ALEXANDER D. J., LEVESON S. H., DUNGLEY K. H., MAUTHE R. J., TURTELTAUB K. W. 1999, Comparative biotransformation studies of MeIQx and PhIP in animal models and humans, Cancer Lett. 143, 161-165.

⁷⁰ SCHMIDT H.-L., BUTZENLECHNER M., ROSSMANN A., SSCHWARZ S., KEXEL H., KEMPE K. 1993, Inter- and intramolecular isotope correlations in organic compounds as a criterion for authenticity identification and origin assignment, Z. Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung, 196, 105-110.

⁷¹ STUIVER M., POLACH H. A. 1977, Reporting of ^{14}C Data, Radiocarbon 19/3, 355-363.

Durch eine gezielte chemische Vorbehandlung der Probe müssen probenfremde Substanzen, die im Laufe der Lagerung in die Probe gelangt sein können, entfernt werden, da der Kohlenstoff dieser Substanzen einen anderen ^{14}C -Gehalt aufweisen kann als der Kohlenstoff der Probe selbst. Eine unzureichende Entfernung von Kontaminationen könnte daher unter Umständen zu einer sehr massiven Verfälschung des Probenalters führen. Bei der Lagerung im Boden können vor allem durch Grundwasser transportierte Huminsäuren (Abbauprodukte pflanzlichen Materials) aus höheren Bodenhorizonten in eine Probe gelangen. Auch ist damit zu rechnen, dass aus dem Grundwasser auch Karbonate an einer Probe abgeschieden werden.

Eine bewährte Methode zur Vorbehandlung der meisten organischen ^{14}C -Proben, wie z. B. Holz, Holzkohle, Samenkörner etc., ist die so genannte AAA (acid-alkali-acid)-Methode, mit der durch die aufeinander folgende Behandlung der Probe mit verdünnter Salzsäure und Natronlauge sowohl die Karbonate als auch die Huminsäuren aus einer Probe entfernt werden.⁷²

Eine ähnliche Strategie wird auch bei der Probenvorbehandlung von Knochen angewendet. Für die Datierung von Knochen wird – bis auf wenige Ausnahmen – nur der auch über längere Zeiträume beständige, organische Knochenanteil, das Kollagen, verwendet. Das in Knochen enthaltene Karbonat wird für die Datierung meist nicht eingesetzt, da hier nicht gewährleistet werden kann, dass nicht zusätzlich Karbonat während der Lagerung in den Knochen gelangt ist. Es muss daher bei der chemischen Aufbereitung von Knochenproben für die ^{14}C -Datierung in einem ersten Schritt die anorganische Knochenmatrix durch eine Säurebehandlung entfernt werden. Eine von den meisten Labors – manchmal in modifizierter Form – angewandte Methode zur weiteren Probenaufbereitung von Knochen ist die von Longin 1971 in Nature publizierte Produktion von Gelatine.⁷³

Bestrebungen, die Knochenbehandlung noch weiter zu verfeinern und in aufwändigen Verfahren knochenspezifische Tripeptide oder Aminosäuren zu isolieren⁷⁴ haben sich nicht bewährt, da solche Methoden einerseits sehr aufwändig sind und andererseits gerade durch die zusätzlichen Reinigungsschritte auch die Gefahr einer zusätzlichen Kontamination in sich bergen. Sie werden daher nicht für die routinemäßige Knochenpräparation von gut erhaltenen Knochen eingesetzt.

Da das Knochenkollagen im Laufe der Zeit und in Abhängigkeit von den an der Lagerstätte herrschenden Umweltbedingungen mehr oder weniger starken Abbauprozessen unterworfen ist, kann es sein, dass Knochen gar nicht ^{14}C -datiert werden können, weil die organische Substanz bereits abgebaut wurde. Weiters gilt auch die Datierung von Knochen mit einem stark reduzierten Kollagengehalt (unter einem Wert von 50% des Rezentgehaltes) als problematisch, da in solchen Knochen unter Umständen ein sehr ungünstiges Verhältnis zwischen probeneigener Substanz (Kollagen) und im Knochen vorhandener Kontamination auftreten kann. Zurzeit gibt es kein generell empfohlenes Reinigungsverfahren für solche Proben.⁷⁵

Nach der chemischen Vorbehandlung wird aus dem Kohlenstoff der organischen Proben durch Oxidation CO_2 produziert und in weiteren Präparationsschritten von anderen bei der Verbrennung anfallenden Reaktionsprodukten (Wasser, N_2 -Gas etc.) abgetrennt. Durch Ausfrieren mit flüssigem Stickstoff in einem Reaktionsgefäß wird das gereinigte CO_2 für den nächsten Abschnitt der Probenpräparation gesammelt.

Die zweite Aufgabe der Probenaufbereitung besteht darin, den als CO_2 vorliegenden Kohlenstoff der Probe in eine für die jeweilige Messtechnik geeignete Form zu bringen. Bei der radiometrischen Nachweismethode ist dies entweder ein geeignetes Zählgas (z. B. CO_2 , CH_4 , etc.), wenn mit einem Proportionalzählrohr die von ^{14}C emittierten Beta-Teilchen registriert werden oder eine mit einem Flüssigszintillator gut mischbare Flüssigkeit, wie z. B. Benzol, wenn als Zählmethode ein Szintillationsmessplatz zur Verfügung steht.⁷⁶

Bei der Beschleuniger-Massenspektrometrie ist es erforderlich, das CO_2 , das aus der Probe erzeugt wurde, zu festem Kohlenstoff (Graphit) zu reduzieren, der dann als Targetmaterial in die Sputter-Ionenquelle des Beschleunigers eingebracht wird. Die zur Zeit von AMS Labors am häufigsten verwendete Methode zur Erzeugung von Graphit-Targets ist die von John Vogel für diesen Zweck adaptierte Bosch-Reaktion, bei der CO_2 mit Wasserstoff in einer katalytisch unterstützten Reaktion zu Kohlenstoff reduziert wird.⁷⁷ Als Katalysator für diese Reaktion wird Eisen- oder Kobaltpulver verwendet, das auf Temperaturen von ca. 600°C erhitzt wird. Der bei der chemischen Reaktion entstehende Kohlenstoff scheidet sich an der Katalysatoroberfläche ab und die Mischung aus Kohlenstoff und Katalysatorpulver wird als Targetmaterial für die AMS benutzt. Auch bei VERA werden die Kohlenstofftargets für die ^{14}C -Messungen nach der „Vogel-Methode“ unter Verwendung von Fe-Pulver als Katalysator hergestellt.⁷⁸

⁷² z. B. MOOK W. G., STREURMAN H. J. 1983, Physical and chemical aspects of radiocarbon dating PACT 8, 31–55.

⁷³ LONGIN R. 1971, New Method of Collagen Extraction for Radiocarbon Dating, Nature 230, 241–242.

⁷⁴ z. B. HEDGES R. E. M., VAN KLINKEN G. J. 1992, A review of current approaches in the pre-treatment of bone for radiocarbon dating by AMS, Radiocarbon 34/3, 279–291.

⁷⁵ HIGHAM T. 1999, Web-info Radiocarbon <http://www.c14dating.com/pret.html>

⁷⁶ z. B. BOWMAN S. 1990, Radiocarbon Dating – Interpreting the Past, British Museum Publications Ltd., 46 Bloomsbury Street, London.

⁷⁷ VOGEL J. S., SOUTHON J. R., NELSON D. E., BROWN T. A. 1984, Performance of catalytically condensed carbon for use in accelerator mass spectrometry, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 5, 289–293.

⁷⁸ WILD Eva, GOLSER Robin, HILLE Peter, KUTSCHERA Walter, PRILLER Alfred, PUCHEGGER Stephan, ROM Werner, STEIER Peter, VYUDILIK Walter 1998, First ^{14}C Results from archaeological and forensic studies at the Vienna Environmental Research Accelerator. Radiocarbon 40/1, 273–281.

2.2.8 Das ^{14}C -Projekt. (Peter Stadler) ⁷⁹

Der glückliche Umstand, dass von Herrn Univ.-Prof. Walter Kutschera am Institut für Radiumchemie und Kernphysik der Universität Wien eine AMS-Anlage installiert worden war, bot uns die Chance, gemeinsam mit Univ.-Prof. Herwig Friesinger vom Institut für Ur- und Frühgeschichte ein Projekt zur Absolutchronologie früher Kulturen in Österreich und Mitteleuropa unter Benutzung dieser AMS Anlage einzureichen.⁸⁰ Dieses Projekt wurde im Frühjahr 1997 vom FWF ungekürzt bewilligt, Projektbeginn war der 1. Juli 1997.

Durch die Tätigkeit unserer Probensammler, Inna Mateiciucova, Hajnalka Herold, Friederike Gerold, Bence Viola und Ângela Carneiro, konnten 1555 Proben gesammelt werden. Ursprünglich waren nur 1000 Proben vorgesehen worden. Leider erwies sich die Probenvorbereitung als derartig langwierig, zumindest bis zur Inbetriebnahme der Achtfachgraphitisierung, dass leider mehr als 500 Proben nicht bearbeitet werden konnten. Zu den Proben wurde eine umfangreiche Datenbank erstellt, mit 74 Feldern, darunter allgemeine Information, Laborresultate, Probenparameter, naturwissenschaftliche Untersuchungen im Bereich Archäobotanik, Zoologie und Anthropologie. Die Tabelle 2 auf Seite 220 zeigt, in welchen Feldern Informationen gesammelt wurden. Das Material der Proben wird in Tabelle 4 auf Seite 221 aufgelistet, das Schwergewicht lag dabei auf den Knochenproben.

Die zeitliche Stellung der Proben reicht vom Paläolithikum bis zum Hochmittelalter (Tabelle 5 auf Seite 222), der geografische Schwerpunkt liegt in Ostösterreich, Mähren, Slowakei und Ungarn. (Tabelle 3 auf Seite 221)

Im Rahmen dieses Projekts wurden bis 2003 insgesamt 985 Datierungen durchgeführt, darunter 160 Daten zur Awarenzeit.

2.2.9 Auswerteverfahren für ^{14}C -Daten.

Zum Glück ist die Einzelkalibration einer ^{14}C -Messung nicht die einzige Möglichkeit zur Auswertung. Ansonsten wäre die Aussagekraft von ^{14}C -Daten ziemlich beschränkt, da das Resultat einer einzelnen Kalibration doch in Abhängigkeit von der Kalibrationskurve ganz unterschiedlich gute bis schlechte Ergebnisse liefert, vor allem wenn vom Archäologen eine präzise Absolutchronologie gewünscht wird. Erst durch den archäologischen Kontext und verschiedene archäologische Nebenbedingungen kann das roh kalibrierte Datum weiter eingengt werden. Aber nur eine Vielzahl von Daten, also richtige Datenserien vermögen das zu liefern, was die Archäologie so dringend benötigt, nämlich eine brauchbare Datierung.

2.2.9.1 Kombinationskalibration.

2.2.9.1.1 Datierung des Eismannes mit Kombinationskalibration.

Die Daten dazu befinden sich in Tabelle 7, auf Seite 230f.

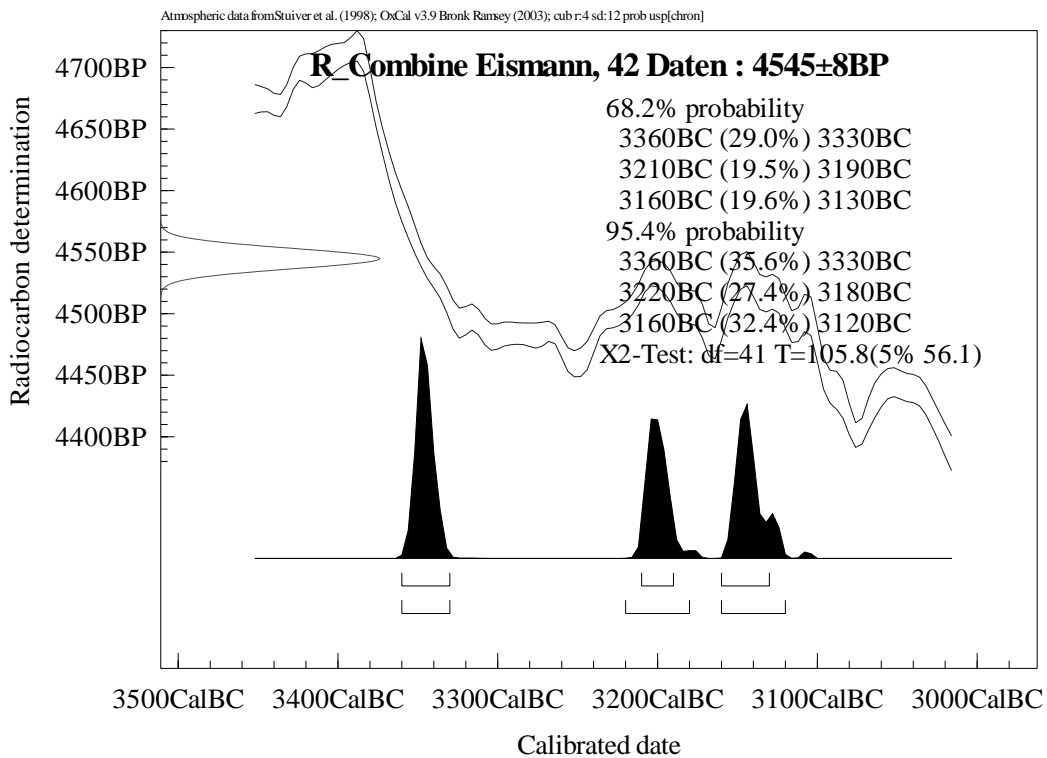
Seit der Eismann 1991 gefunden wurde, konnten viele ^{14}C -Messungen durchgeführt werden. Proben wurden in Oxford, Groningen, Uppsala, Gif sur Yvette und auch in Wien im VERA Laboratorium gemessen. In der Kombinationskalibration von gegenwärtig 42 Daten kann man den Eismann auf acht Jahre genau datieren, aber nur im ^{14}C -Alter. Die Abbildung 23 zeigt die Resultate der vorhandenen Daten in einer Kombinationskalibration. Der χ^2 -Test wird nicht erfüllt, was bedeutet, dass nicht alle Proben von einem Ereignis stammen können. Das ist nicht weiter erstaunlich, da ja zusammen mit der Gletscherleiche auch andere Gegenstände gefunden wurden, die viel älter und jünger waren.⁸¹ Aber immerhin ergibt die Kalibration drei Intervalle.

⁷⁹ Ab hier wurde wieder alles von Peter Stadler verfasst.

⁸⁰ Der genaue Projekttitle des FWF-Projektes P12253-PHY war: FRIESINGER Herwig, KUTSCHERA Walter, STADLER Peter, WILD Eva „Absolute Chronology for Early Civilisations in Austria and Central Europe using ^{14}C Dating with Accelerator Mass Spectrometry“.

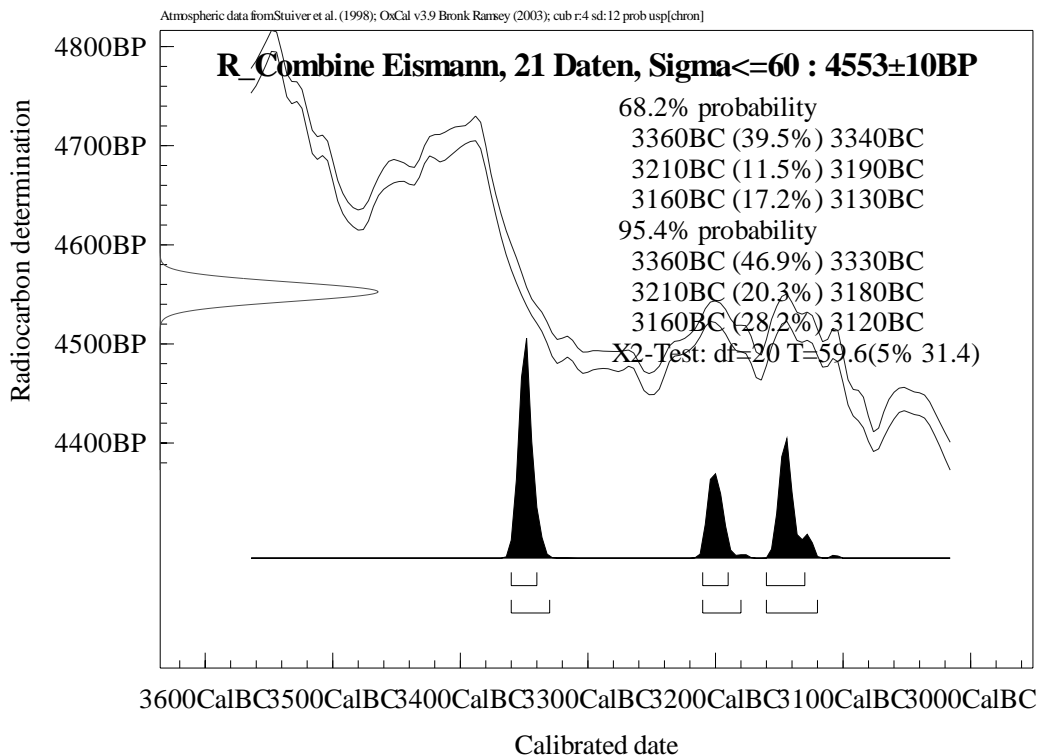
⁸¹ ROM Werner, GOLSER Robin, KUTSCHERA Walter, PRILLER Alfred, STEIER Peter, WILD Eva Maria 1999. AMS ^{14}C Dating of Equipment from the Iceman and of Spruce Logs from the Prehistoric Salt Mines of Hallstatt. Radiocarbon 41/2, 183f.

Abbildung 23, Kombinationskalibration zum Mann vom Hauslabjoch (Eismann) von 42 Daten.



In der nächsten Abbildung 24 werden nur die Messergebnisse mit einem σ kleiner als 60 Jahre zusammen kalibriert. Dieses Resultat zeigt, dass auch genauere Messungen die Datierung nicht viel besser bestimmen können, außer wenn man davon absieht, dass die beiden jüngeren Lösungen etwas weniger wahrscheinlich werden. Weitere Verbesserungen erhält man nur, wenn man ein spezielles weiteres Verfahren anwendet, das wir später diskutieren wollen.

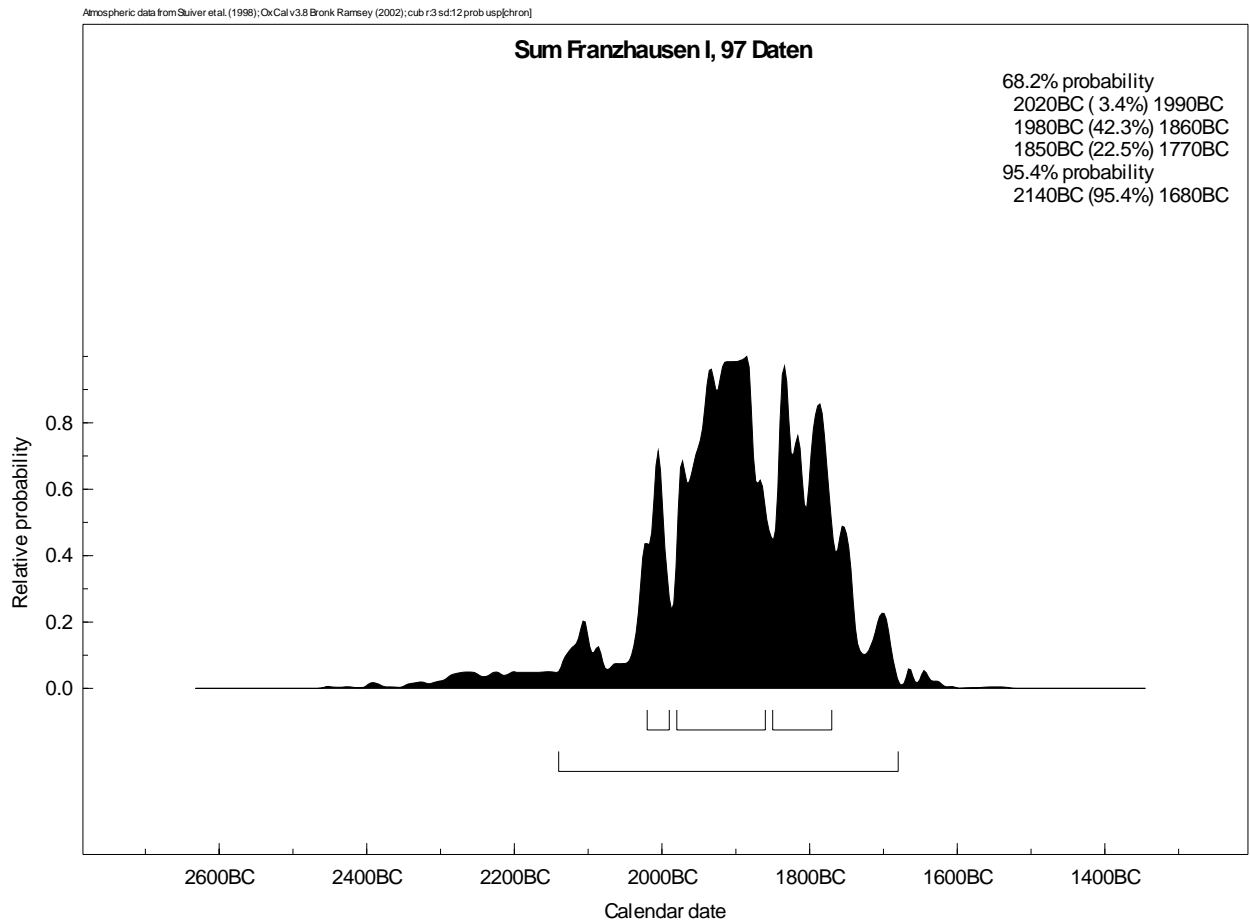
Abbildung 24, Kombinationskalibration zum Mann vom Hauslabjoch (Eismann) von 21 Daten mit $\sigma \leq 60a$.



2.2.9.2 Summenkalibration.

Summenkalibrationen verwendet man, wenn die Gesamtdauer einer Kultur aus einer Serie von ^{14}C -Daten erfasst werden soll. Die einzelnen Kalibrationen werden zur Summenkalibration aufsummiert. Hat man aufeinander folgende Kulturen, dann liegt die größte Wahrscheinlichkeit für den Wechsel von einer Kultur zur anderen zwischen dem 1- σ -Intervall und dem 2- σ -Intervall. Als Beispiel, ebenfalls mit Messungen aus unserem ^{14}C -Projekt, die Summenkalibration von knapp 100 Messungen zum frühbronzezeitlichen Gräberfeld von Franzhausen I.⁸²

Abbildung 25, Summenkalibration zum frühbronzezeitlichen Gräberfeld von Franzhausen I mit 97 Daten.



Der „wahre“ Wert für die Zeitspanne der Gräberfeldbelegung, liegt zwischen dem 1- und 2- σ -Intervall, also etwa 2050–1750 v. Chr.

All diese Kalibrationen haben verschiedene Anwendungsbereiche, so richtig „verbessert“ werden können ^{14}C -Daten erst durch die Anwendung einer Art von Statistik, die zwar schon im 18. Jh. entwickelt wurde, sich aber erst in letzter Zeit durchzusetzen begann.

⁸² NEUGEBAUER-MARESCH Christine, NEUGEBAUER Johannes-Wolfgang 1997, Franzhausen, das frühbronzezeitliche Gräberfeld I. FÖ Materialhefte A 5.

2.2.9.3 Einführung in die Bayes'sche Statistik.

„It's taken 250 years for the rest of us to realize just how intelligent Thomas Bayes was.“
Mike R. Lynch

Abbildung 26, Reverend Thomas Bayes 1702–1761.



Bayes'sche Methoden werden in der Statistik zunehmend populär, insbesondere für komplexe Fragestellungen wie Mustererkennung oder inverse Probleme der Datenanalyse. Diese „Renaissance“ wurde ausgelöst durch die schnelle Zunahme der zur Verfügung stehenden Rechenleistung, prinzipielle Probleme der „klassischen Statistik“ sowie durch eine fruchtbare Verbindung zur Statistischen Physik z. B. auf dem Gebiet der Monte-Carlo-Methoden. Die hauptsächlichlichen Berechnungen in Verbindung mit der Auswertung von ^{14}C -Daten sind Integrale, die mittels eines MCMC-Samplers⁸³ möglichst viele unterschiedliche Lösungen berechnen, um ein optimales Resultat zu finden.

Wichtige Elemente der Bayes'schen Statistik sind die **a priori** und **a posteriori** Verteilungen auf dem Parameterraum. Die **a priori** Verteilung ermöglicht es dem Statistiker, zusätzliche Information in das statistische Modell einzubringen.

Die Essenz der Bayes'schen Annäherung⁸⁴ ist es, ein mathematisches Gesetz zu formulieren, wie man sein vorhandenes Wissen im Lichte neuer Evidenz verändern sollte. Anders gesagt, es erlaubt dem Wissenschaftler neue Daten mit seinem vorhandenen Fachwissen zu kombinieren.

Ein erklärendes Beispiel dazu mag das Verhalten eines Babys sein, das den ersten Sonnenuntergang erlebt, und sich fragt, ob die Sonne wieder aufgehen wird oder nicht. Es gibt beiden Möglichkeiten gleich große „prior“ Wahrscheinlichkeiten und demonstriert das, indem es sowohl eine weiße als auch eine schwarze Kugel in einen Sack gibt. Am nächsten Tag, wenn die Sonne wieder aufgeht, gibt das Kind wieder eine weiße Kugel in den Sack. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällig aus dem Sack gegriffene Kugel eine weiße ist (und damit die

Erwartungen des Kindes repräsentiert), hat sich von $\frac{1}{2}$ zu $\frac{2}{3}$ verändert. U. s. w. Graduell wird die ursprüngliche

Meinung, dass die Sonne genauso wahrscheinlich nicht mehr aufgeht wie dass sie aufgeht, in eine fast vollständige Sicherheit verändert, dass sie immer aufgeht.

In einer mathematischen Formel ausgedrückt bedeutet das Bayes'sche Gesetz:

$$\text{posterior} = \frac{\text{bedingte Wahrscheinlichkeit} * \text{prior}}{\text{Wahrscheinlichkeit}}$$

oder in mathematischen Symbolen:

$$P(R=r | e) = \frac{P(e | R=r) * P(R=r)}{P(e)}$$

wobei $P(R=r | e)$ die Wahrscheinlichkeit bedeutet, dass die zufällige Variable R einen Wert r bei gegebener Tatsache e hat. Der Nenner ist nur eine Normalisierungskonstante, die sicherstellt, dass das posterior einen Wert

⁸³ BRONK RAMSEY Christopher 2003, OxCal manual.

⁸⁴ Hier eine einfache Einführung in Bayes' Gesetz aus einem Artikel im Economist (9/30/00) <http://www.ai.mit.edu/~murphyk/Bayes/bayes.html>

kleiner 1 ergibt. Dieser Nenner kann berechnet werden, indem alle Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Werte von R addiert werden.

$$P(e) = P(R=0, e) + P(R=1, e) + \dots = \sum_r P(e | R=r) * P(R=r)$$

In den folgenden Beispielen wird das archäologische Vorwissen als **prior** aufgefasst, ob das nun von der Kenntnis der Stratigrafie, Dendrochronologie, intuitiv oder durch andere mathematische Verfahren wie Seriation, Korrespondenzanalyse oder Analyse der N Nächsten Nachbarn stammt, um die ¹⁴C-Kalibration in der **posteriori** Analyse einzuschränken.

2.2.9.4 Das „Wiggle Matching“.

Dem Dendrochronologen sehr geläufig und dennoch umstritten ist das „wiggle matching“, bei dem man ¹⁴C-Proben aus einer so genannten „floating chronology“ in wohl definierten Jahrringabständen nimmt. Im Fall vieler Dendrochronologien, die nicht bis heute laufen, ist das die einzige Möglichkeit zu einer Absolutchronologie zu gelangen. Umstritten ist das Verfahren, da man ja ¹⁴C-Daten mit einer ¹⁴C-datierten Standard-Dendrokurve (der Kalibrationskurve) kalibriert, um eine andere Dendrokurve letztlich zu datieren. Dabei beißt sich die Katze sozusagen in den Schwanz. Denn die gegenseitige Abhängigkeit von Dendrochronologie und ¹⁴C wird hier ganz offensichtlich.

Für die „floating dendrochronology“ lässt sich nun direkt kein Beweis führen, zu groß ist die Abhängigkeit von ¹⁴C-Datierung und Kalibrationskurve.

Andererseits kann man aus Analogiegründen eine bis in die Jetztzeit laufende Dendrochronologie testen. Unter anderem wurde so eine Untersuchung für die 7000 Jahre zurückreichende Zirbenchronologie von Kurt Nicolussi in Zusammenarbeit mit Walter Kutschera durchgeführt.⁸⁵ Zu dem Zweck wurde ein 500-jähriger Abschnitt aus dem dritten Jahrtausend vor Christus aus der Zirben-Dendrokurve alle 10 Jahre beprobt und mittels AMS ¹⁴C datiert. Die dabei zur normalen Kalibrationskurve festgestellten Abweichungen erwiesen sich als minimal und können aufgrund der Tatsache, dass die Eichen der ¹⁴C-Kalibrationskurve auf Meereshöhe und die Zirben an der Waldgrenze wachsen, auf die unterschiedlichen Hauptwachstumszeiten dieser Bäume und die saisonale Schwankung der ¹⁴C-Produktion zurückgeführt werden.

Nun zu einem Beispiel, bei dem man versucht, Eichenbretter aus einem awarenzeitlichen Brunnen, die von Otto Cichocki dendrodatiert wurden, mittels ¹⁴C und „wiggle matching“ zu überprüfen.

Für das Programm OxCal kann man einen Job schreiben, der folgendermaßen aussieht.

Texttabelle 8, „wiggle matching“ zweier Bretter aus dem awarenzeitlichen Brunnen von Brunn am Gebirge.

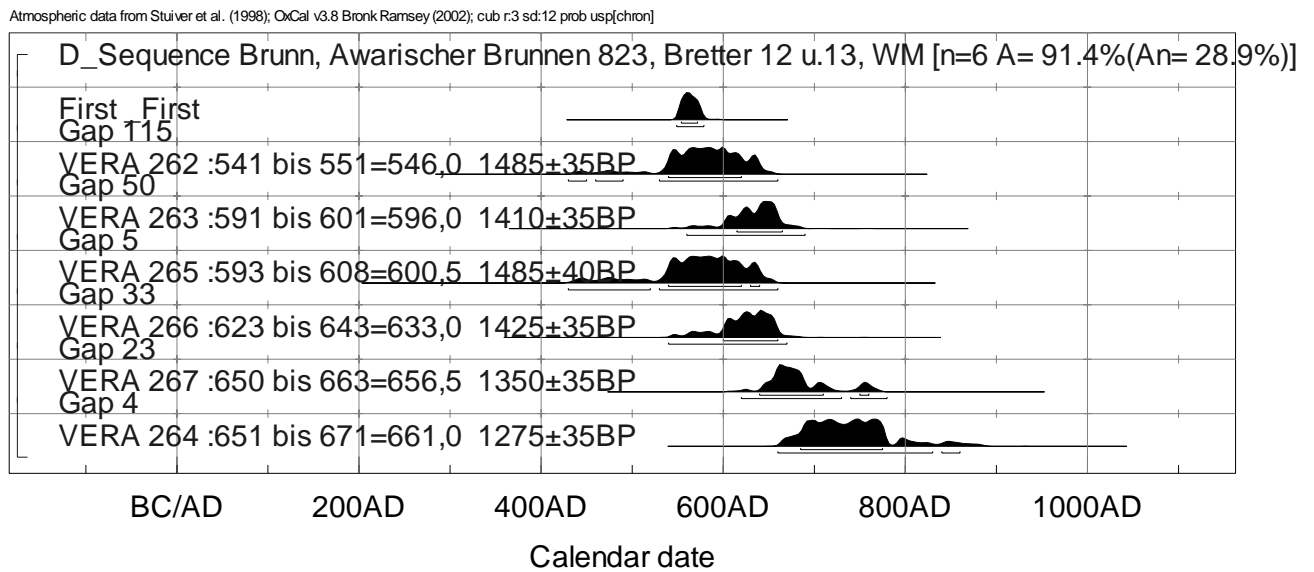
```
D_SEQ „Brunn, Awarischer Brunnen 823, Bretter 12 u.13,WM“
{
  DATE „VERA 262 :541 bis 551=546,0“      1485      35; GAP 50.0;
  DATE „VERA 263 :591 bis 601=596,0“      1410      35; GAP 4.5;
  DATE „VERA 265 :593 bis 608=600,5“      1485      40; GAP 32.5;
  DATE „VERA 266 :623 bis 643=633,0“      1425      35; GAP 22.5;
  DATE „VERA 267 :650 bis 663=656,5“      1350      35; GAP 4.5;
  DATE „VERA 264 :651 bis 671=661,0“      1275      35;
};
```

Die Zahlen nach der Labornummer sind der erste und der letzte Jahrring der Probe, danach steht der Mittelwert. Diese Werte stehen zusammen mit der Labornummer im Kommentar und werden für die weiteren Auswertungen nicht verwendet. Danach folgen die ¹⁴C-Messergebnisse in Jahren BP und der 1-σ-Fehler des Messergebnisses, dann folgt nach dem Stichwort „GAP“ der Jahrringabstand der Probenmittelwerte. Sie ergeben sich als Abstand des Mittelwertes in der gleichen Zeile zu dem in der nächsten Zeile. Vom Programm OxCal aus sind mittlerweile auch Dezimalzahlen möglich, da ja auch halbe Jahre bei den Mittelwerten auftreten können.⁸⁶ Das Kalibrationsergebnis dieses Jobs sieht man in der folgenden Abbildung 27.

⁸⁵ DELLINGER Franz, KUTSCHERA Walter, STEIER Peter, WILD Eva Maria, NICOLUSSI Kurt, SCHIESSLING Peter 2004, A ¹⁴C calibration with AMS from 3500 to 3000 BC, derived from a new high-elevation stone-pine tree-ring chronology. Radiocarbon, in press.

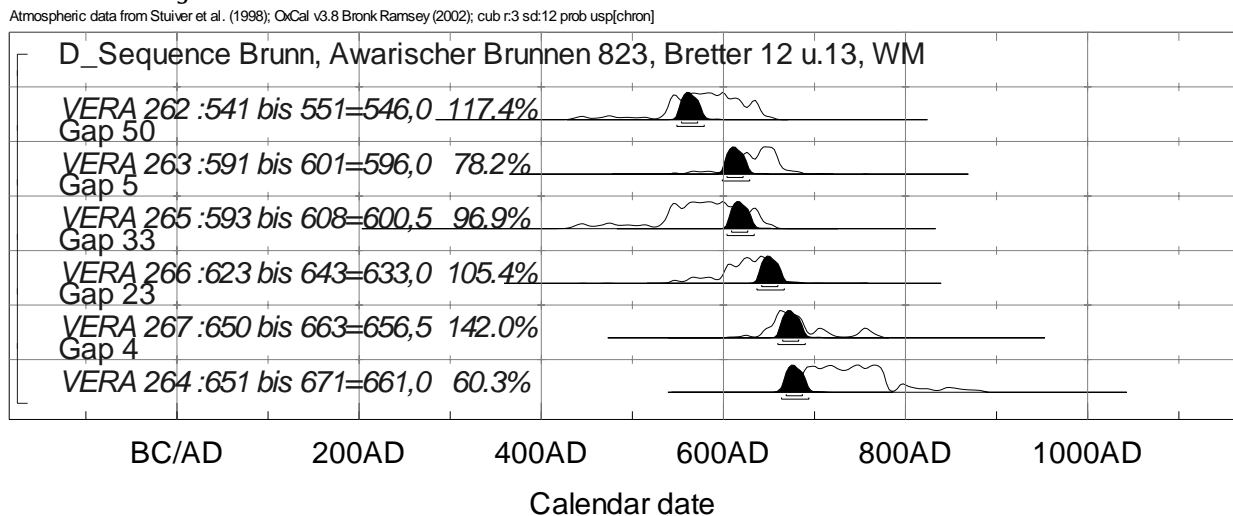
⁸⁶ Das ist zumindest richtig für die letzte Version 3.9.

Abbildung 27, Kalibration der Ergebnisse der Bretter 12 und 13 des awarenzeitlichen Brunnens von Brunn am Gebirge.



Hier folgt nun in Abbildung 28 das „wiggle matching“. Dazu gibt es in oberer Abbildung 27 den Korrelationskoeffizienten $A=91,4\%$, der größer sein müsste als $28,9\%$ um ein signifikantes Ergebnis zu liefern. Das ist bei weitem erfüllt.

Abbildung 28, Wiggle Matching der Ergebnisse der Bretter 12 u.13 des awarenzeitlichen Brunnens von Brunn am Gebirge.

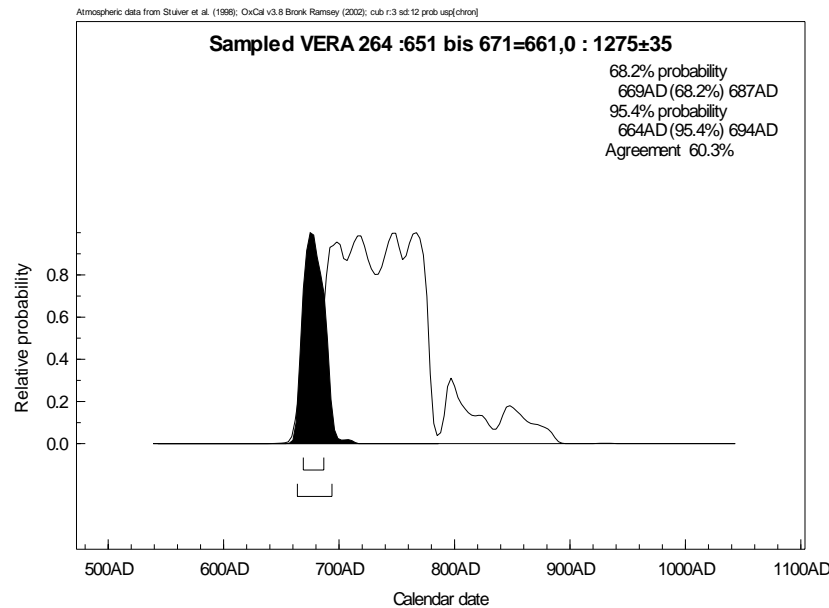


In diesem Fall versucht das Programm optimale Lösungen für die schwarzen Flächen innerhalb der weißen Flächen der Gesamtkalibration so auszuwählen, dass folgende Randbedingungen erfüllt sind: Die Jahrringabstände der Proben. Die Proben VERA-263 und VERA-265 liegen im Mittel nur 4,5 Jahre auseinander, deshalb wird für beide eine ziemlich gleiche Lösung ausgewählt. Probe VERA-262 ist jedoch 50 Jahre älter als VERA-263, somit wird auch eine ca. 50 Jahre ältere Lösung ausgesucht.

Für alle Proben wird eine Lösung erhalten, die zumindest zu mehr als 60,3% mit der einfachen Kalibration übereinstimmt. Dabei werden auch Werte bis zu 142% erhalten. 100% erhält man, wenn die schwarze Fläche gleich der weißen ist. Werte über 100 % können erhalten werden, wenn die schwarze Fläche mit der weißen Fläche nur in ihrem höchsten Teil überlappt. Proben, die weniger als 60% „agreement index“ haben, müssen in ihrem Jahrringabstand in Frage gestellt werden. D. h man kann so auch Fehler in der Dendrochronologie, also Fehler bei der Überlappung der Bretter erkennen. In unserem Beispiel ist das jedoch nicht der Fall.

Nun zur Datierung der jüngsten Probe:

Abbildung 29, Wiggle Matching der jüngsten Probe des awarenzeitlichen Brunnens von Brunn am Gebirge.



Der Bereich der schwarzen Fläche auf dem 1- σ -Niveau reicht von 669–687 AD. Damit liegt der zu erwartende Mittelwert für die dendrochronologische Altersbestimmung von 661 AD um mindestens 8 Jahre außerhalb dieses Intervalls. Nimmt man das 2- σ -Niveau, dann ist sie immerhin noch um mindestens 4 Jahre daneben.

An und für sich könnte man mit so geringen Abweichungen zufrieden sein. Es scheint, dass die „floating dendrochronology“ der beiden Bretter von Brunn richtig ist, dass jedoch vielleicht Probleme beim Einpassen in die Deutsche Eichenkurve eine mögliche Ursache der Diskrepanzen sein könnten. Andererseits könnte die nicht berücksichtigte Jahrringverteilung innerhalb der Probe – d. h. eventuell haben die äußeren Jahrringe einen höheren Anteil – eine Rolle spielen. Jedenfalls scheint die „floating dendrochronology“, also die Verbindung von Brett 12 und 18 problemlos mit dem „wiggle matching“ in Einklang zu bringen zu sein.

2.2.9.5 Kann man den Mann vom Hauslabjoch noch genauer datieren?

Wie wir oben gesehen haben, kann der „Ice man = Eismann“ trotz zahlreicher Einzelmessungen nicht genauer datiert werden. Auch nach der Kombinationskalibration bleiben drei gleichwertige Lösungen über, die eine um 3350 v. Chr., die zweite ca. um 3200 und die dritte um 3150 v. Chr.

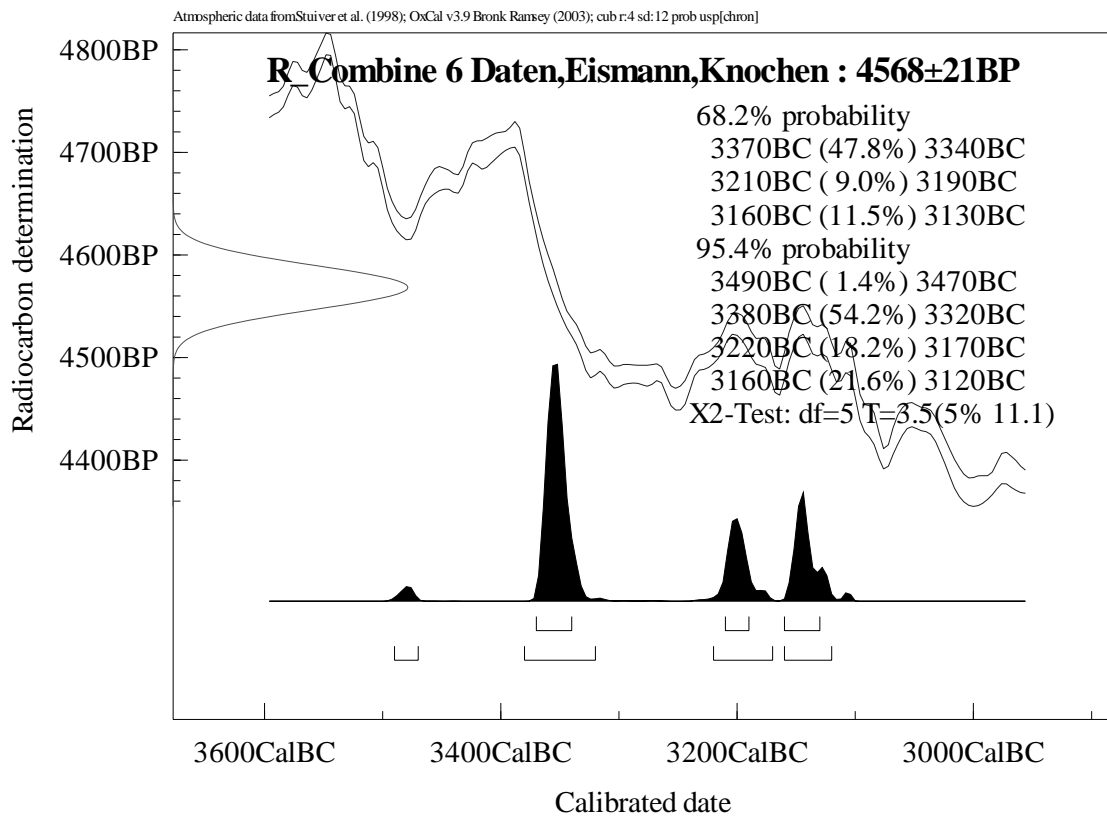
Nun kann man versuchen, die Proben des Eismannes in zwei Gruppen zu klassifizieren, in ältere und jüngere aufgrund des datierten Materials.⁸⁷ Denn das Knochenkollagen sollte auch beim Eismann, der ein Lebensalter von 40–45 Jahren⁸⁸ erreichte, um einiges älter sein als die jüngeren, „kurzlebigen“ Gräser vom Mantel, von den Schuhen und der Köcherversteifung, ebenso wie seine Haare.

Tatsächlich erhält man unterschiedliche Ergebnisse bei den Kombinationskalibrationen.

⁸⁷ Zu ähnlichen Schlussfolgerungen und Ergebnissen kam Christopher Bronk-Ramsey anlässlich eines Vortrages in Wien im Jänner 2004. Wir wissen allerdings nicht, wie viele und welche Daten er benutzte.

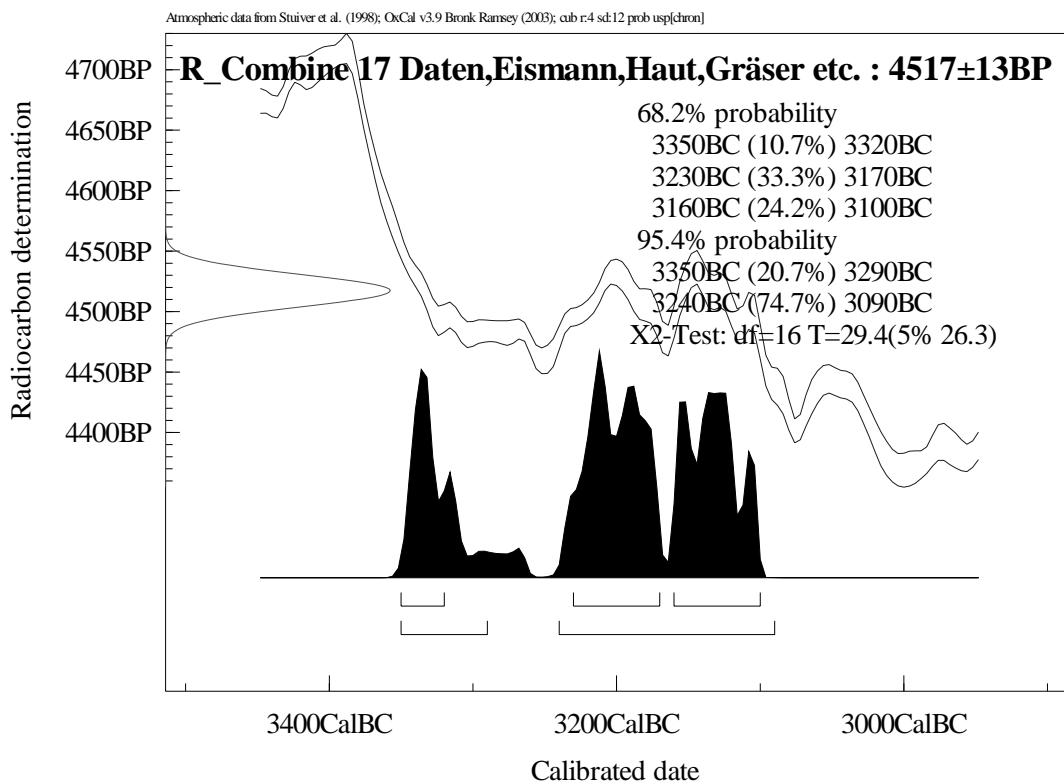
⁸⁸ Die Altersangabe verdanken wir Maria Teschler, die ja selbst den Eismann untersuchen konnte.

Abbildung 30, Kombinationskalibration der älteren Proben vom Mann vom Hauslabjoch.



Die Lösung in Abbildung 30 favorisiert schon die älteste Lösung um etwa 3350 v. Chr.

Abbildung 31, Kombinationskalibration der jüngeren Proben vom Mann vom Hauslabjoch (Eismann).

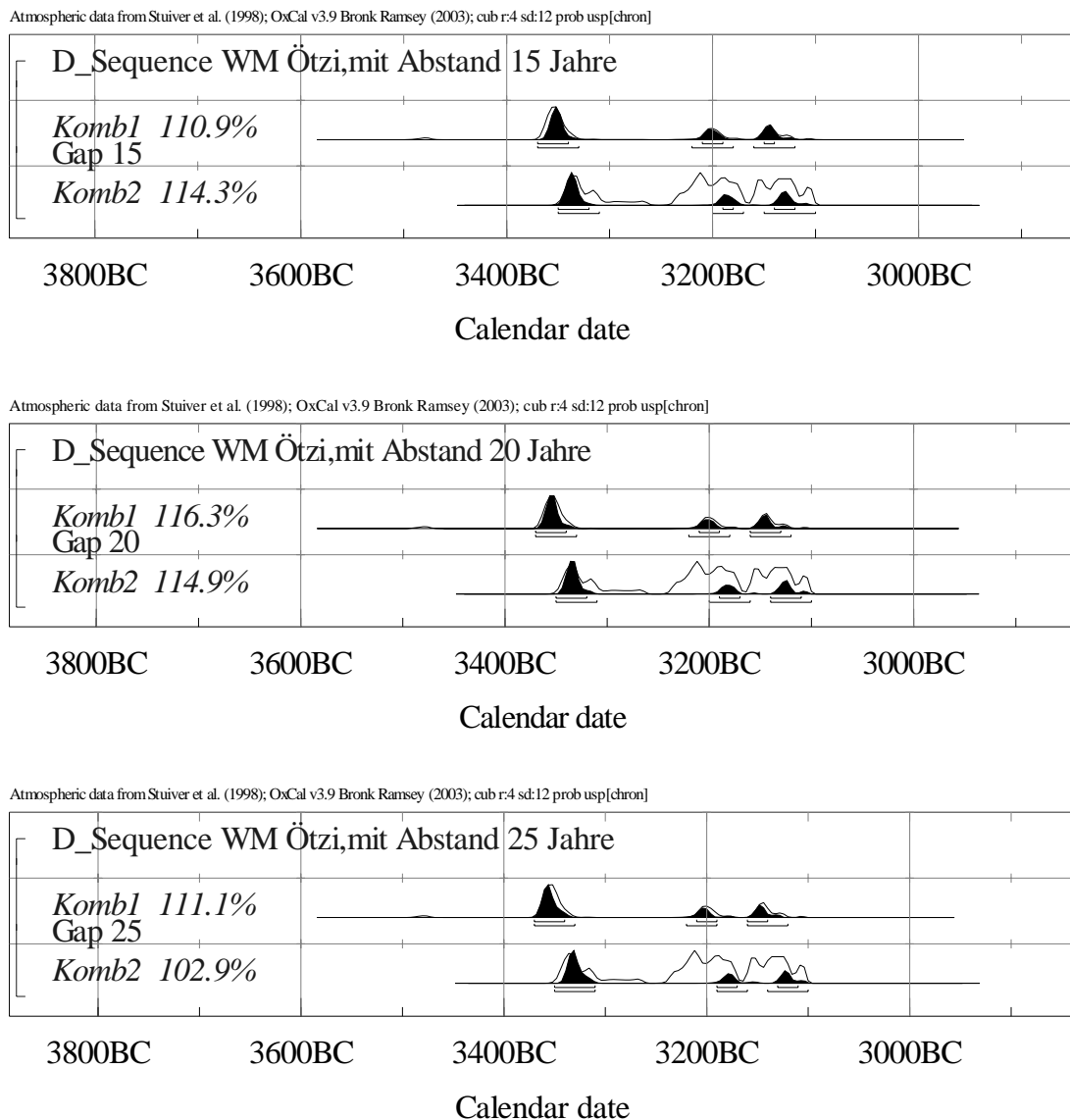


D. h. zweifelsfrei ist das Knochenkollagen älter, der Unterschied im unkalibrierten Radiocarbonalter beträgt im Mittel 51 Jahre. Nach der Kalibration erhalten wir wieder 3 Lösungen, von denen keine bevorzugt werden darf.

Wenn man die gleichen Untersuchungen nur mit den Proben macht, die wirklich vom menschlichen Körper stammen, also Messungen von Knochen, Haut und Haaren, jeweils also 6 Proben (in der Tabelle auf der CD-ROM in der zweiten Spalte Phasen2), dann erhält man für die älteren Proben 4568 ± 21 , für die jüngeren 4503 ± 22 , also eine noch größere Differenz von 65 Jahren.

Wir können nun versuchen, das Lebensalter in unsere Betrachtungen mit einzubeziehen. Der „Abstand“ zwischen Kollagen und Haaren sollte bei einem Alter von 40 Jahren etwa 20 Jahre betragen, bei 45 Jahren etwa 25 Jahre. Sehen wir uns nun mehrere „wiggly matchings“ mit Altersabständen zwischen Kollagen und Haaren von 15, 20 und 25 Jahren an. Diese drei Abstände werden getestet, da nicht wirklich klar ist, in welchem genauen Zusammenhang der Abstand zum Sterbealter steht und ja auch das Sterbealter zwischen 40 und 45 Jahren liegt.

Abbildung 32, WM mit Abstand 15, 20 und 25 Jahren.



Im Allgemeinen sind die drei Lösungen sehr ähnlich und favorisieren die älteste Datierung für den Eismann. Wir erhalten bei einem zeitlichen Abstand von 20 Jahren für das zwanzigste Jahr des Eismannes, das Jahr aus dem das Kollagen stammt, ein Datierungsintervall von 3370–3340 auf dem $1-\sigma$ -Niveau. Für das vierzigste Jahr ergibt sich ein Intervall von 3350–3320. Wenn wir das Leben des Eismannes insgesamt bestimmen wollen, dann von 3390–3360 als Intervall für seine Geburt und von 3350–3320 v. Chr. für seinen Tod.

Die folgenden Abbildungen 33–35 zeigen den gleichen Sachverhalt noch in Form von Einzelkalibrationen. Wie wir aus den Grafiken erkennen, verbleibt eine statistisch sehr geringe Möglichkeit von 9,9% bzw. 13,4% für die beiden späteren Datierungen. Gegenüber der „normalen“ Kombinationskalibration, in der alle drei Lösungen ziemlich gleich gewichtet waren, ist das jedoch ein enormer Fortschritt.

Abbildung 33, Datierung des 20. Lebensjahres des Eismannes durch Kollagen unter Voraussetzung eines 20-jährigen Abstandes.

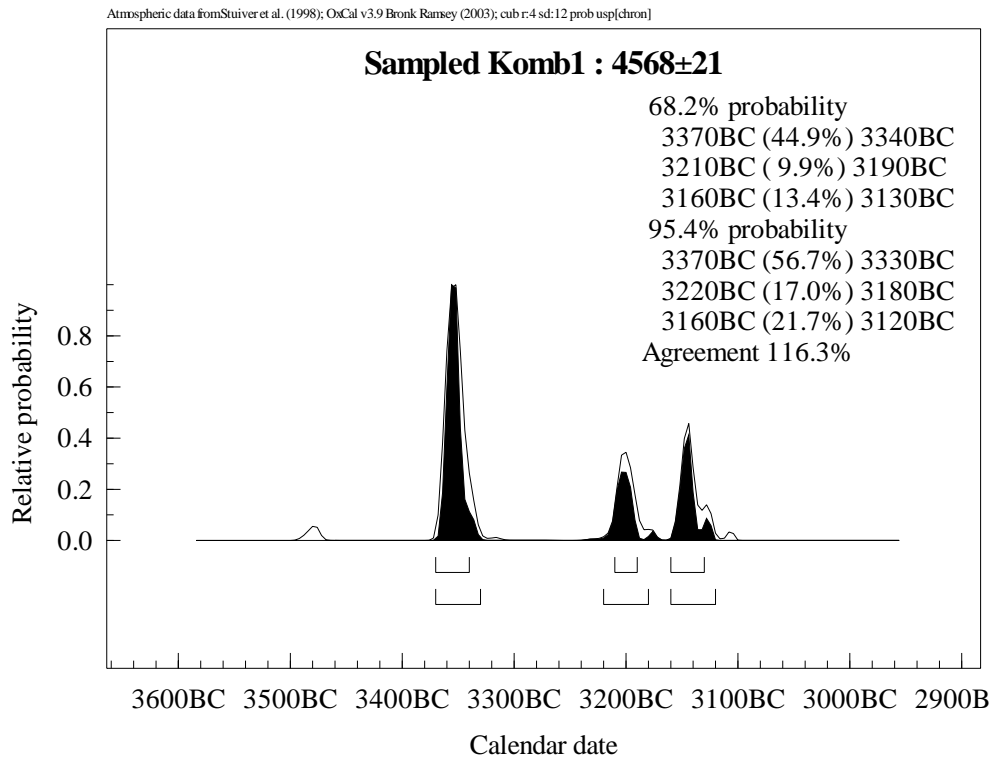
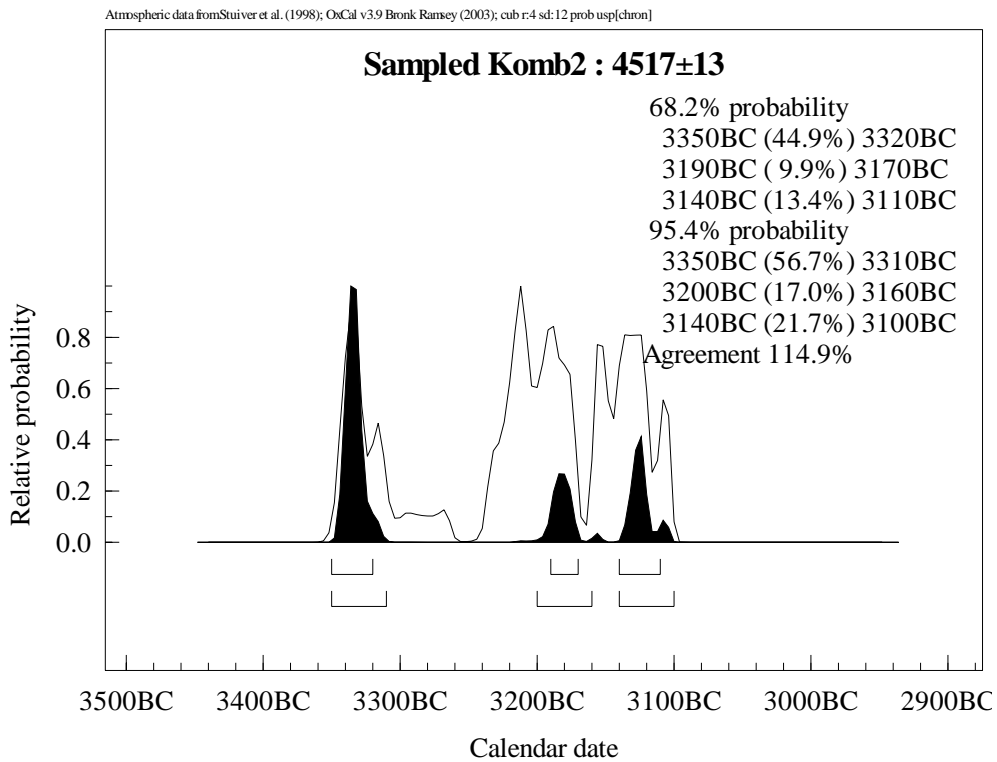


Abbildung 34, Datierung des 40. Lebensjahres des Eismannes durch Haare, Gras etc. unter Voraussetzung eines 20-jährigen Abstandes.



Texttabelle 9, Datierung des Eismannes unter Annahme eines 20-jährigen Abstandes zwischen Kollagen und Haaren.

Jahr	Intervall im 1- σ -Bereich	
	Beginn	Ende
Geburt	3390	3360
20. Lebensjahr	3370	3340
40. Lebensjahr = Tod	3350	3320

Macht man das „Sequencing“ nur mit den Proben vom menschlichen Körper, erhält man genauso die Favorisierung der ältestmöglichen Datierung, die Wahrscheinlichkeit der anderen Datierungen ist jedoch aufgrund der geringeren statistischen Sicherheit bei der kleineren Probenzahl etwas größer als zuvor.

Diese Ergebnisse stehen nun im Gegensatz zu unseren früheren Vermutungen, dass ein „Event“ um ungefähr 3200 v. Chr. mit der Überdeckung des Eismannes mit Schnee und Eis in Zusammenhang stehen könnte.⁸⁹

Eine Möglichkeit, diese Frage von einem anderen Blickwinkel anzugehen, wäre die Untersuchung der Jahrringe des Eibenbogens, der zusammen mit dem Eismann gefunden wurde. Wenn hier mehr als 60–80 Jahrringe bei der dünnwüchsigen Eibe zu erwarten wären, könnte damit ebenfalls ein „wiggle matching“ eine Überprüfung unserer hier präsentierten Datierung ermöglichen.

Nun wenden wir uns einem Beispiel aus unserem SCIEM2000 Projektbereich zu.⁹⁰



2.2.9.6 Simulation der Datierung der Aschenschichte der Santorineruption im Pollenprofil von Gölhisar Gölü mit ¹⁴C und „Wiggle Matching“.

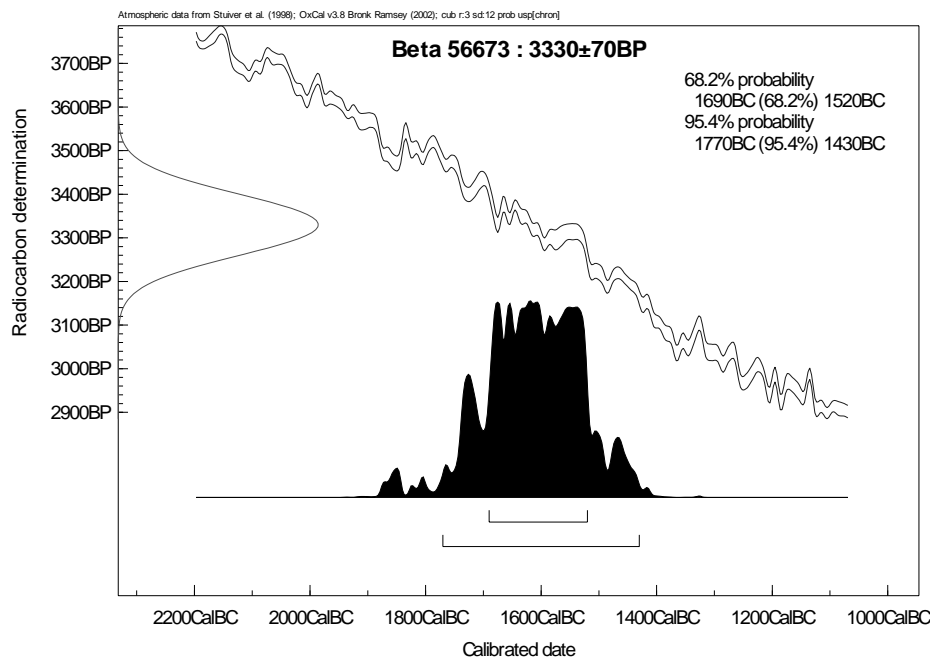
Die Publikation des Pollenprofils durch Eastwood et al.⁹¹ gibt in unmittelbarem Bereich der Schicht mit der Thera-Eruptions-Asche ein ¹⁴C-Datum von 3330 ± 70 BP an, dort kalibriert mit ~ 1600 BC. Die folgende Abbildung zeigt das Kalibrationsergebnis. Tatsächlich erhält man auf dem 1- σ -Niveau ein Intervall von 1690–1520, siehe Abbildung 35. D. h. sowohl die naturwissenschaftliche als auch die historische Datierung wären danach also möglich.

⁸⁹ STADLER Peter, DRAXLER Susanne, FRIESINGER Herwig, KUTSCHERA Walter, PRILLER Alfred, ROM Werner, STEIER, Peter, WILD Eva 2000, Status of the Austrian Science Fund Project P 12253-PHY: Absolute Chronology for Early Civilisations in Austria and Central Europe using ¹⁴C Dating with Accelerator Mass Spectrometry. 35 Seiten, 28 Tabellen, 61 Abbildungen, Manuskript, 25-27.

⁹⁰ The Synchronization of Civilizations in the Eastern Mediterranean in the 2nd Millennium BC. Projektsprecher des Sonderforschungsbereiches Univ. Prof. Dr. Manfred Bietak. Die Projekt Homepage befindet sich hier: <http://www.sciem2000.info>.

⁹¹ EASTWOOD W. J., ROBERTS N., LAMB H. F., TIBBY J. C. 1999, Holocene environmental change in southwest Turkey: a palaeoecological record of lake and catchment-related changes. *Quaternary Science Reviews* 18, 671–695.

Abbildung 35, Einzelkalibration der Aschenschicht von Gölhisar Gölü.



Vorausschickend soll gleich angemerkt werden, dass das hier angewandte Verfahren zwar mit dem „wiggly matching“ verwandt ist, jedoch im Allgemeinen in der Fachliteratur mit anderen Namen wie „sequencing“ oder „sequence“ bedacht ist.

Simulationen bieten sich immer dann an, wenn noch keine oder nicht ausreichend Messungen gemacht wurden und wenn man ermitteln will, welche die optimale Probenkonstellation sein könnte. Mit OxCal wurden mehrere Simulationen durchgeführt, um die kostengünstigste Variante unter möglicher Optimierung der Genauigkeit des Ergebnisses zu ermitteln.

Dabei zeigt sich eine Zahl von 11 Proben als ausreichend. 5 Proben oberhalb der Schicht, 5 Proben unterhalb und eine in der Schicht sollten möglichst im Abstand von ca. 10 Jahren von einander ausgewählt werden. Damit wäre der Abstand zwischen oberster und unterster Probe mit ca. 100 Jahren zu veranschlagen. Das bedeutet im Profil GHA ca. 8–10 cm. D. h. die Proben sollten ca. alle 1 cm beginnend 5 cm unterhalb der Aschenschicht bis 5 cm oberhalb gezogen werden. Die Sedimentationsrate kann als ziemlich gleichmäßig angesehen werden, in 10000 Jahren BP wurden etwa 800 cm Sedimentation erreicht, also ca. 12,5 Jahre/cm. Diese Information über den zeitlichen Abstand, die ja nur eine Schätzung ist, fließt nicht in die weiteren Berechnungen ein.

Die Proben müssten dann mittels Hochpräzisions-AMS (σ ca. 20a) gemessen werden, was bei VERA möglich wäre, da ja auch die Zirbenholzkalibrationskurve nach diesem Prinzip bestimmt wurde.

Die Ergebnisse dieser Simulation sehen folgendermaßen aus. Die Tests wurden zunächst unter der Voraussetzung der Richtigkeit des naturwissenschaftlichen Datierungsansatzes der Thera-Eruption gemacht.

Zunächst das Job-File in Abbildung 10, mit dem in OxCal diese Auswertungen vorgenommen werden können:

Texttabelle 10, Job-File für die Simulation des Thera-Ausbruchs um 1640 v. Chr.

```

Sequence „Beispiel mit Thera-Ausbruch um 1640“
{
  Boundary;
  Sequence
  {
    R_Simulate „s01 -1690 20“ -1690 20;
    R_Simulate „s02 -1680 20“ -1680 20;
    R_Simulate „s03 -1670 20“ -1670 20;
    R_Simulate „s04 -1660 20“ -1660 20;
    R_Simulate „s05 -1650 20“ -1650 20;
    !Thera-Ausbruch
    R_Simulate „s06 -1640 20“ -1640 20;
    !Thera-Ausbruch
    R_Simulate „s07 -1630 20“ -1630 20;
    R_Simulate „s08 -1620 20“ -1620 20;
    R_Simulate „s09 -1610 20“ -1610 20;
    R_Simulate „s10 -1600 20“ -1600 20;
    R_Simulate „s11 -1590 20“ -1590 20;
  };
  Boundary;

  Span „span seq“;
};

```

Die Prozedur R_Simulate produziert dabei simulierte ^{14}C -Messergebnisse, die nach ihrer Verteilung rund um den Mittelwert bei vorgegebenem Messfehler tatsächlich realen ^{14}C -Datierungen sehr nahe kommen. Dazu kommt, dass bedingt durch ein jeweils unterschiedliches „seed“ für den Zufallszahlengenerator bei jeder weiteren Berechnung unterschiedliche Resultate erhalten werden, was der Realität entspricht, denn auch bei jeder neuen Messung werden unterschiedliche Resultate erzielt, allerdings genauso definiert durch den wahren Mittelwert und den Messfehler. In den folgenden beiden Abbildungen 36 und 37 und sehen wir zunächst die Kalibration und das Sequencing der simulierten Daten.

Abbildung 36, Gölhisar Gölü, Kalibration, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1640 BC.

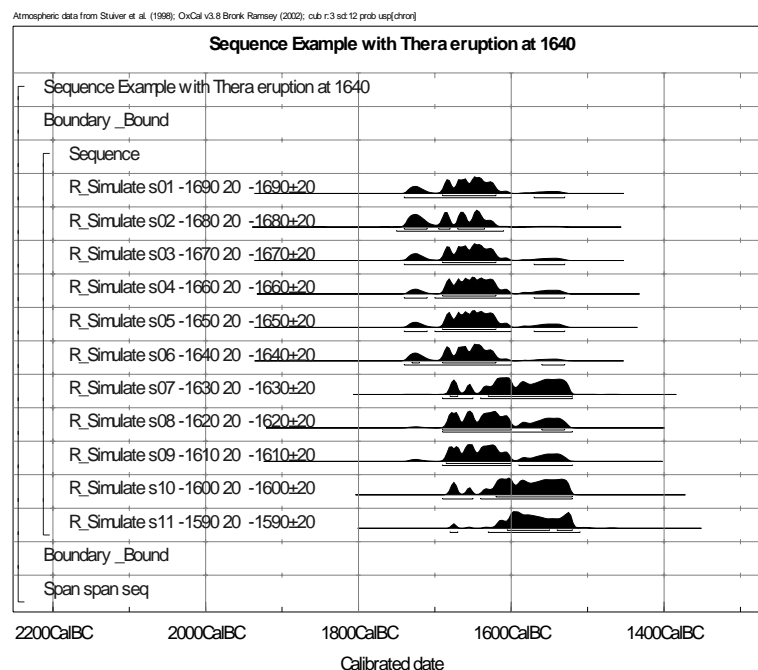
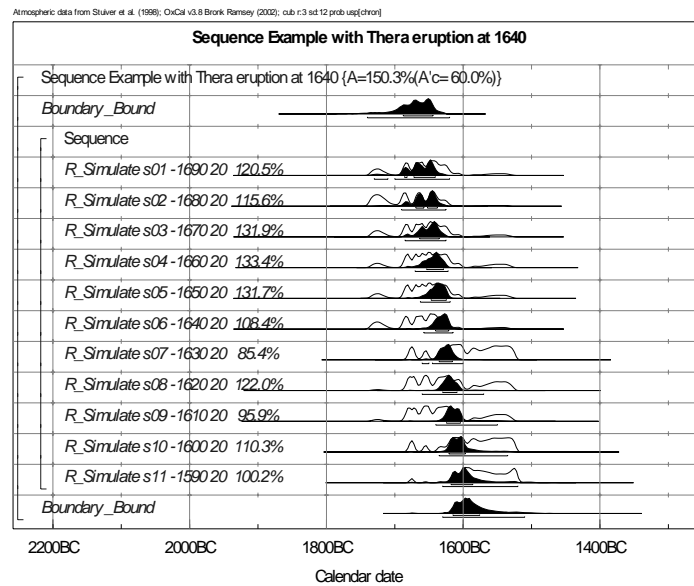
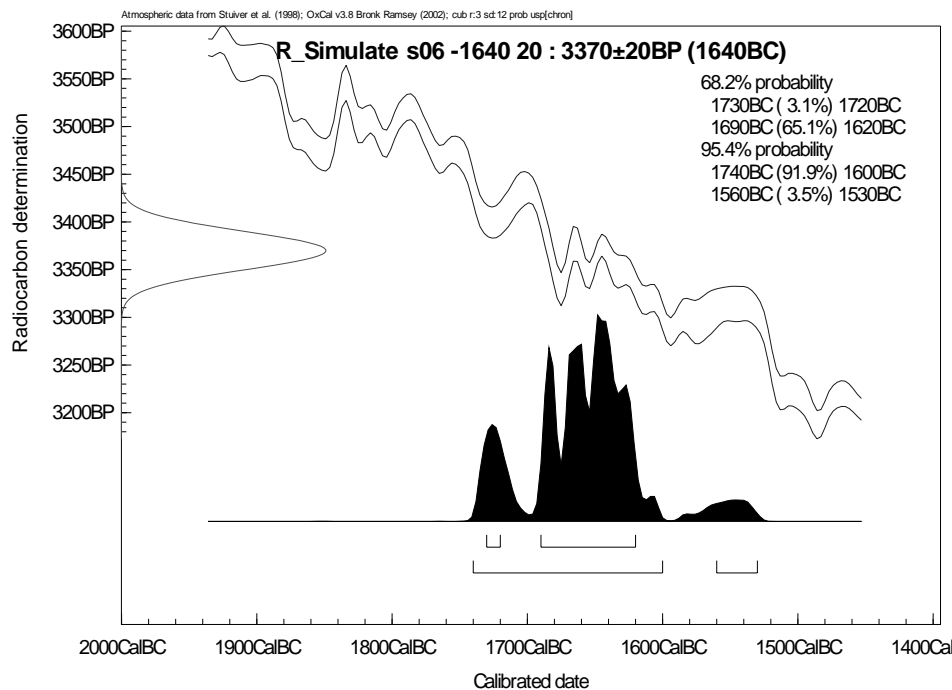


Abbildung 37, Gölhisar Gölü, WM, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1640 BC.



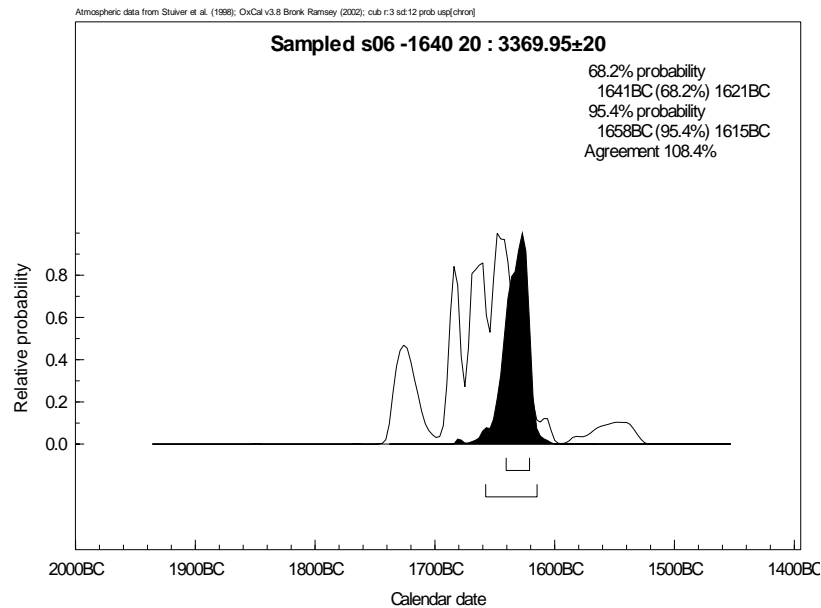
Die Einzelprobe aus dieser Serie, die am nächsten bei der Eruption liegt (1640 BC) würde folgendermaßen kalibriert werden: auf dem 1- σ -Niveau von 1730–1620 BC. Die zugehörigen Grafiken sind in der Abbildung 38 und 39 zu sehen.

Abbildung 38, WM Gölhisar Gölü, Kalibration der Einzelprobe zum Ausbruch, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1640 BC.



Das „sequencing“ oder „wiggel matching“ dieser Probe liefert folgendes Ergebnis, die Einzelprobe aus dieser Serie, die am nächsten bei der Eruption liegt (1640 BC) würde durch das „wiggel matching“ folgendermaßen datiert:

Abbildung 39, WM Gölhisar Gölü, WM der Einzelprobe zum Ausbruch, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1640 BC.



D. h. die schwarze – mit „wiggles matching“ ermittelte- Fläche ergibt ein Intervall auf dem 1- σ -Niveau von 1641–1621, der „wahre“ Wert von 1640 liegt gerade innerhalb.

Warum funktioniert dieses Verfahren nun, obwohl hier keine Jahrringabstände eingehen? Denn die etwa zehn Jahre Abstand, die zwischen den hypothetischen Proben eingehalten werden, werden bei diesem Verfahren (*sequence*) für die Auswertung nicht benutzt. Es wird lediglich die Reihenfolge der Proben verwendet. Programm OxCal mit seinem Gibbs-sampler optimiert nun die schwarzen Flächen unter den weißen Flächen unter Einhaltung der Randbedingungen, die da lauten: Alle Proben befinden sich in einer Sequenz, d. h. wenn man das Alter der Proben mit $a[1]$ bis $a[i]$ bezeichnet, gilt $a[1] \geq a[2]$ oder allgemein formuliert $a[i] \geq a[i+1]$.

Nun spielt hier bei der Optimierung natürlich die Lage der „wiggles“ in der Kalibrationskurve eine wichtige Rolle. Nehmen wir die Probe genau um 1640 BC, siehe Abbildung 39. Bei ihr ist die schwarze Fläche genau über dem letzten oder jüngsten höheren „wiggles“ der Einzelkalibration oder der weißen Fläche. Ein späteres „wiggles“ würde einen „agreement index“ unter 60% haben und damit die Sequenz in Frage stellen. Damit ist die schwarze Fläche sozusagen schon am spätestmöglichen wiggle angeordnet. Die nachfolgenden Proben haben in der einfachen Kalibration (weiße Fläche) weitere wiggles, die nun sukzessive für die weiteren schwarzen Flächen herangezogen werden können.

Nochmals zum Resultat des „wiggles matching“ bei der zuletzt besprochenen Probe: Das Datierungsintervall kann durch das „wiggles matching“ im 1- σ -Bereich von 1730–1620 auf 1658–1615 reduziert werden. Diese Genauigkeit kann bei anderen Konstellationen (mehr Proben, längerer Zeitraum etc.) kaum mehr unterboten werden. Für die Fragestellung, welche der beiden Chronologien die richtige ist, sollte sie jedoch bei weitem ausreichend sein.

Sollte die historische Datierung richtig sein, so würde das ganz analog funktionieren. Das soll im Weiteren gezeigt werden, mit einer angenommenen Datierung der Eruption um 1500. (Bei anderen Annahmen wäre das ebenfalls analog durchzuführen) Dazu wieder das entsprechende Job-File:

Texttabelle 11, Job-File für die Simulation des Thera-Ausbruchs um 1500 v. Chr.

```

Sequence „Beispiel mit Thera-Ausbruch um 1500“
{
  Boundary;
  Sequence
  {
    R_Simulate „s01 -1550 20“ -1550 20;
    R_Simulate „s02 -1540 20“ -1540 20;
    R_Simulate „s03 -1530 20“ -1530 20;
    R_Simulate „s04 -1520 20“ -1520 20;
    R_Simulate „s05 -1510 20“ -1510 20;
    ! Thera-Ausbruch
    R_Simulate „s06 -1500 20“ -1500 20;
    ! Thera-Ausbruch
    R_Simulate „s07 -1490 20“ -1490 20;
    R_Simulate „s08 -1480 20“ -1480 20;
    R_Simulate „s09 -1470 20“ -1470 20;
    R_Simulate „s10 -1460 20“ -1460 20;
    R_Simulate „s11 -1450 20“ -1450 20;
  };
  Boundary;
  Span „span seq“;
};

```

Dazu nun die beiden Abbildungen Abbildung 40 und 41:

Abbildung 40, WM Gölhisar Gölü, Kalibration, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1500 BC.

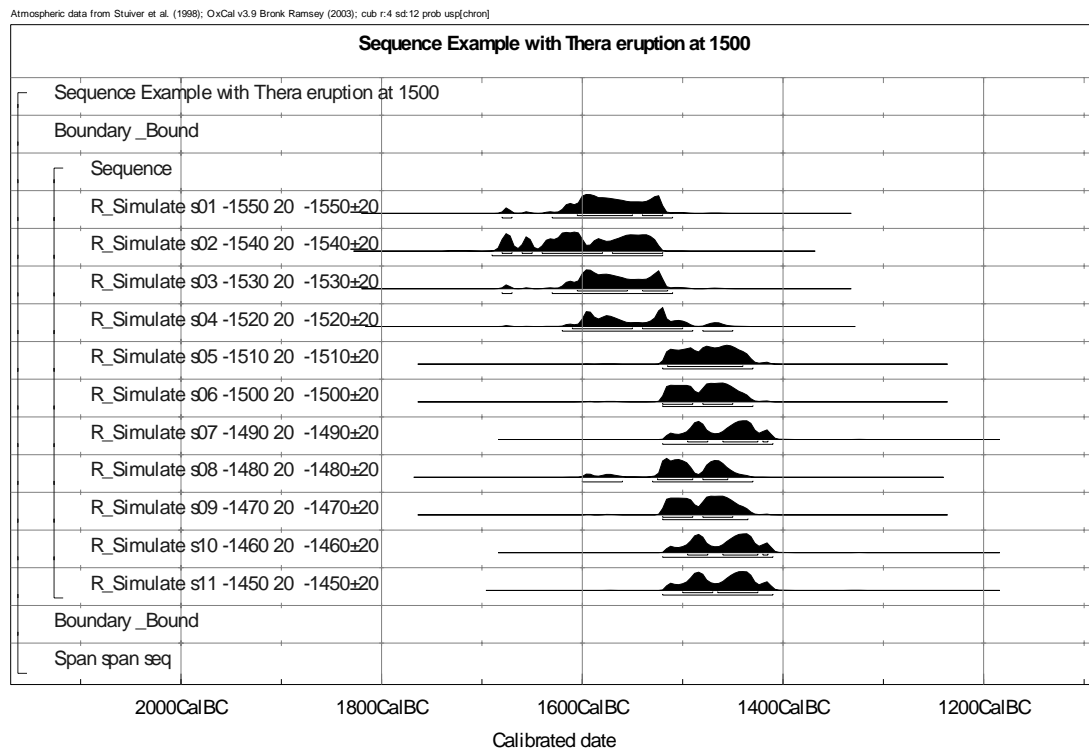
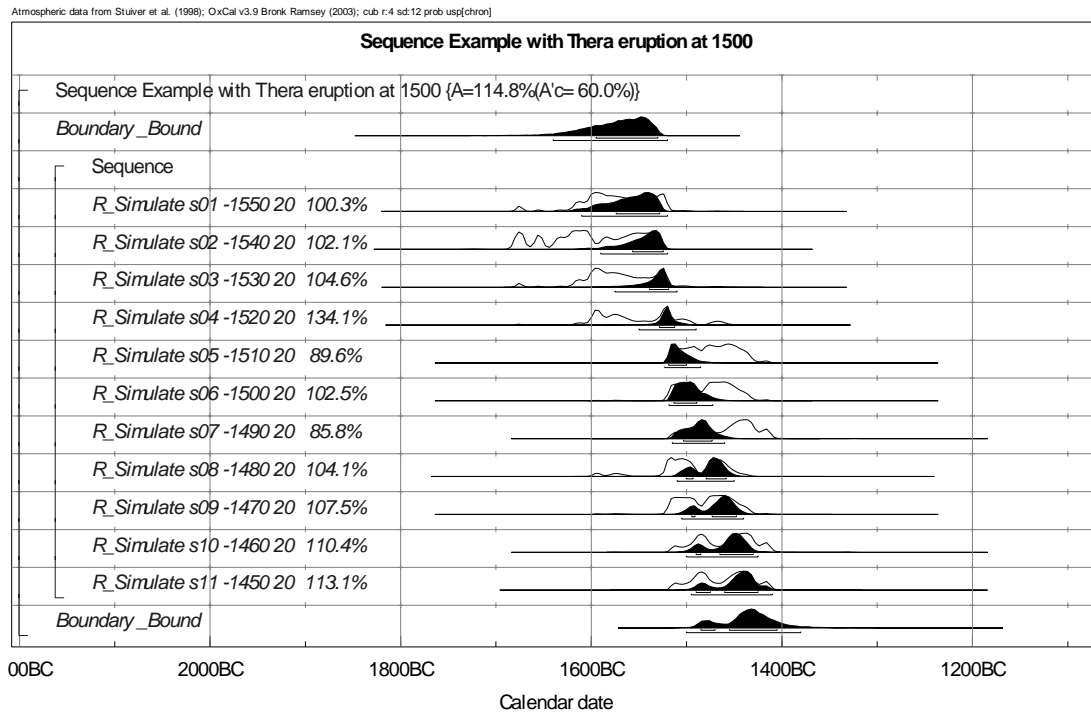
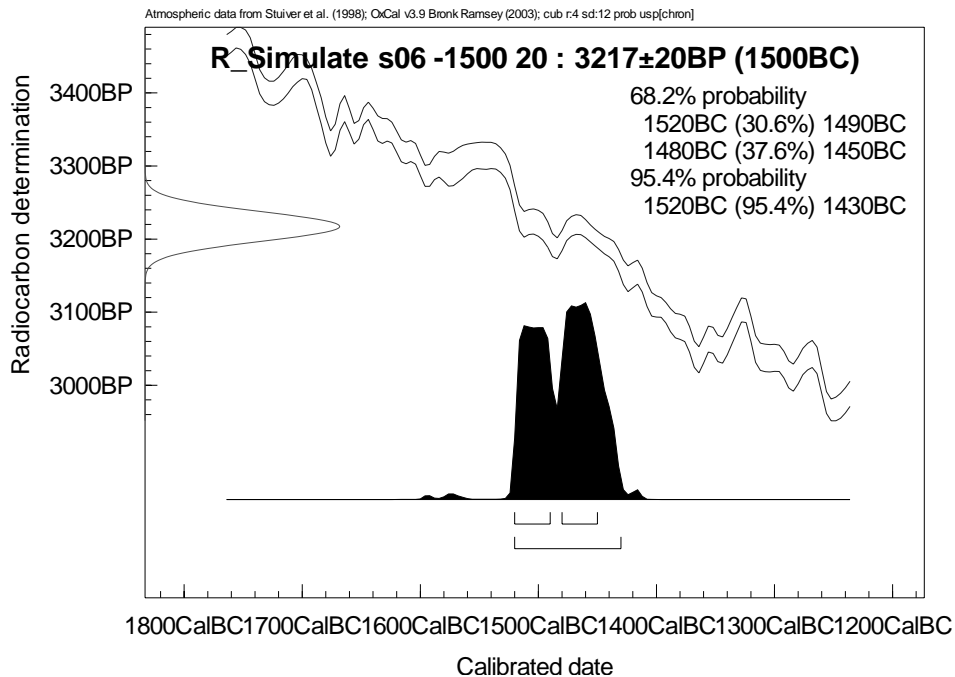


Abbildung 41, WM Gölhisar Gölü, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1500 BC.



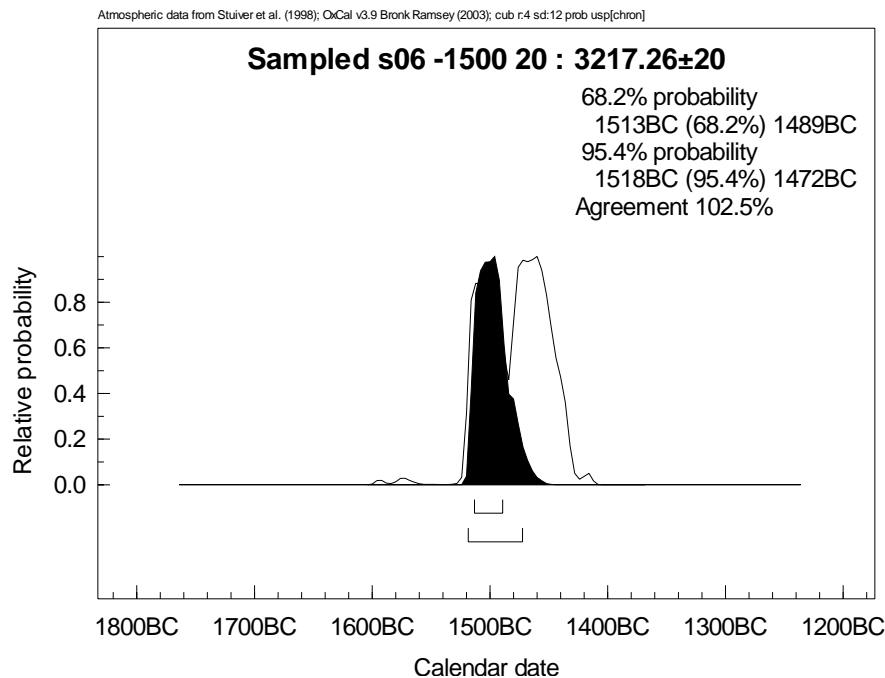
Die Einzelprobe aus dieser Serie, die am nächsten bei der Eruption liegt (1500 BC, nach der Ägyptischen Chronologie) ergibt bei der Einzelkalibration auf dem 1- σ -Niveau folgendes Intervall: 1520–1450 BC, siehe Abbildung 42.

Abbildung 42, Gölhisar Gölü, Kalibration, Einzelprobe vom Ausbruch, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1500 BC.



Dieses Intervall würde durch das wiggle matching weiter reduziert werden, und zwar auf 1513–1489 BC, siehe Abbildung 43. Damit liegt der (erwartete) Wert von 1500 sowohl innerhalb des 1- σ - als auch klarerweise des 2- σ -Intervalls.

Abbildung 43, Gölhisar Gölü, WM, Einzelprobe vom Ausbruch, mit präsumtivem Thera-Ausbruch um 1500 BC.



2.2.9.7 Variable „Sequence“.

Diese Form des „wiggle matching“ entspricht fast vollständig der einfachen Form mit Jahrringabständen mit dem Unterschied, dass zusätzlich zu dem Jahrringabstand auch ein σ für diesen Abstand angegeben werden kann. Das folgende Beispiel ist dem OxCal-Hilfe-File entnommen (siehe Texttabelle 12). Nach dem Eintrag Gap wird zuerst der Jahrringabstand angegeben, in unserem Beispiel mit 50, dann folgt das σ dieses Abstandes mit 10 Jahren.

Texttabelle 12, Beispiel einer variablen Sequenz mit σ für den Jahrringabstand.

```
V_Sequence „Beispiel Variable Sequence“
{
R_Simulate 0 30; Gap 50 10;
R_Simulate 50 30; Gap 50 10;
R_Simulate 100 30; Gap 50 10;
R_Simulate 150 30; Gap 50 10;
R_Simulate 200 30; Gap 50 10;
R_Simulate 250 30;
};
```

Meines Erachtens kann man das ideale Anwendungsgebiet dafür in der Dendrochronologie kaum finden, denn dort gibt es entweder sehr exakte oder sehr unterschiedliche Lösungen. Wenn dagegen eine „Sequence“ archäologischer Fundkomplexe von anderen Verfahren produziert wird, wie Seriation, Korrespondenzanalyse oder Analyse der N Nächsten Nachbarn, kann diese mit V_Sequence ausgewertet werden. Denn jedes mathematische Verfahren, das eine „Sequence“ ermittelt, kann für die Fundkomplexe, aber auch die Typen ein σ angeben. Dazu muss man jedoch zunächst „hypothetische“ Jahrringabstände berechnen oder abschätzen und die Größe ihres Fehlers (das σ). Das kann nur gelingen, wenn man den gesamtzeitlichen Rahmen seiner Fundkomplexe kennt. Daraus lässt sich dann der SD/a-Koeffizient berechnen, nach folgender Formel:

$$SD/a = \frac{SD_{\text{Gesamt}}}{\text{Jahre}_{\text{Gesamt}}}$$

dabei bedeutet:

SD/a = Sequenzdaten pro Jahr, also der SD/a-Koeffizient.

SD_{Gesamt} = der gesamte Bereich der Sequenzdaten, also bei WinSerion 1000 SD.

Jahre_{Gesamt} = die Gesamtdauer in Jahren.

Da jedoch in den seltensten Fällen die Sequenzdaten äquidistant bezüglich der absoluten Jahrskala sind, dass heißt gleichen SD-Abständen gleiche Zeiträume entsprechen, kann das nur eine Annäherung an ein ideales Resultat sein. In einem Beispiel mit der awarischen Seriation weiter unten werden wir zeigen, wie man in solch einem Fall, unter Berechnung mehrerer SD/a-Koeffizienten für verschiedene Sequenzdatenbereiche umgehen kann.

Ich hoffe damit gezeigt zu haben, dass ein „wiggle matching“ oder besser gesagt eine „sequence“ von ¹⁴C-Daten so gut kalibriert werden kann, dass dann eigentlich kaum mehr Zweifel an der Datierung verbleiben könnten.

2.2.9.8 Viele Möglichkeiten von Fehlern bei Proben für ¹⁴C-Daten.

Sieht man sich die Labornummern von ¹⁴C-Daten an, dann sollten eigentlich weltweit viele Hunderttausende von Resultaten vorliegen. Im Rahmen unseres ¹⁴C-Projektes haben wir versucht, zumindest für den mitteleuropäischen Raum die publizierten Messungen in Form einer Datenbank zusammenzustellen. Auf viel mehr als 20.000 Daten sind wir dabei nicht gekommen. Was ist also mit den anderen Messergebnissen passiert? Da die meisten ¹⁴C-Labors ihre Ergebnisse nicht automatisch publizieren,⁹² sondern die Publikation dem Auftraggeber, der die Messungen bezahlt, überlassen, kann diese Frage nicht so einfach beantwortet werden. Wie es scheint, werden Messergebnisse, die dem Auftraggeber nicht ins Konzept passen, einfach nicht veröffentlicht.

Da muss man nun die Frage stellen, wie es dazu kommt, dass Messungen nicht passen. Der Archäologe würde die Verantwortung am liebsten auf die ¹⁴C-Methode oder das Labor abschieben. Ein geflügeltes Wort ist „Einmal habe ich eine ¹⁴C-Messung ausprobiert, das Ergebnis war eine Katastrophe, seither lasse ich keine weiteren Untersuchungen machen“.

Aber wenn man die Abläufe kennt, die zwischen dem Zeitpunkt der Ausgrabung bis zum Einlangen der Probe im Labor liegen, dann weiß man, dass viele Fehler sehr wohl im Bereich der Archäologie passieren können.

Zunächst gibt es die Stratigrafiefehler. Wenn keine optimale Grabung gemacht wird, dann kann es vorkommen, dass man Intrusionen, also später angelegte Gruben übersieht, die jüngeres Fundmaterial in ältere Schichten gebracht haben. Auch die Tätigkeit von Maulwürfen in Form von Krotowinen kann eine Ursache sein.

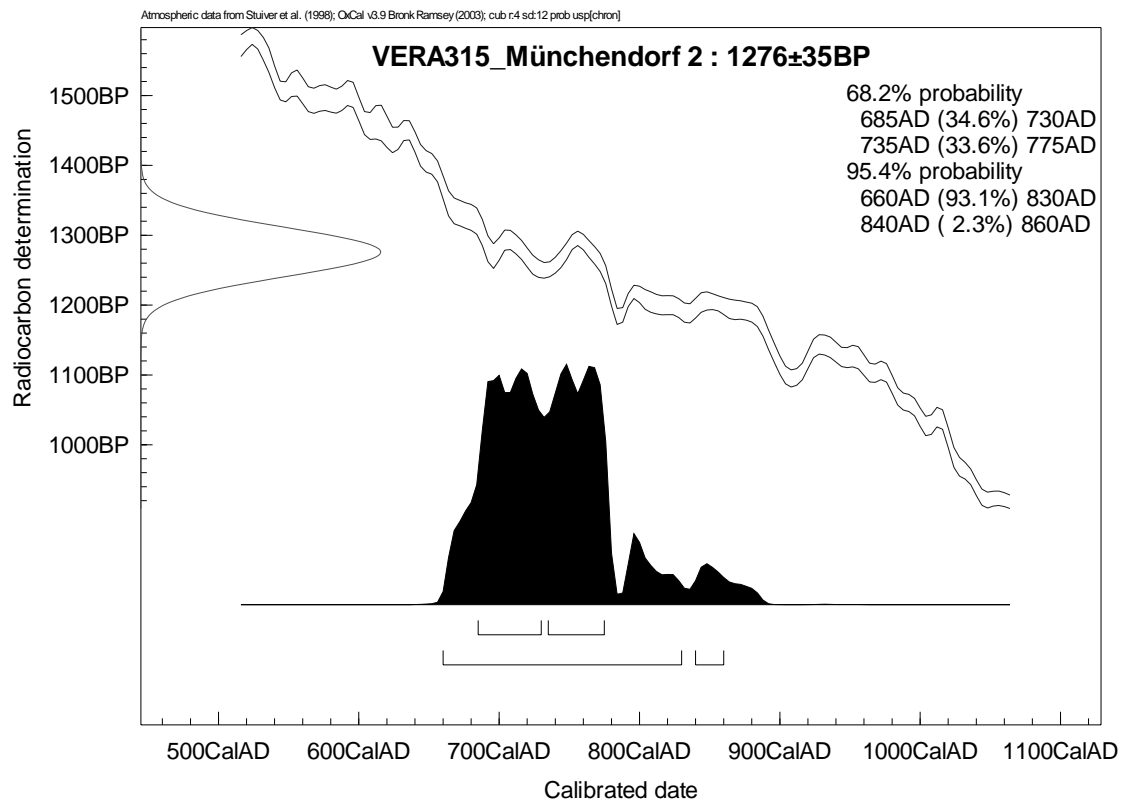
Aber auch die besten Grabungen können nichts daran ändern, dass bei einer Mehrphasigkeit einer Siedlung in prähistorischer Zeit Schichten oder Grubeninhalte umgelagert wurden, was letztlich dazu führt, dass älteres Fundmaterial in jüngeren Schichten angetroffen wird.

Fehler können auch bei der Fundverwaltung vorkommen: Proben werden einfach mit dem falschen Etikett versehen. Tier- oder Menschenknochen werden gewaschen, egal ob auf der Grabung oder im Depot, dabei kann schon die eine oder andere Verwechslung passieren. Denn „errare humanum est“.

Dazu ein Beispiel: Wir wollten das awarische Frauengrab 1 von Münchendorf ¹⁴C-datieren, welches das einzige Grab dieser Fundstelle sein sollte, das archäologisch noch in Fall datiert werden kann. (Siehe das Fundmaterial auf Tafel 62) Die folgende Grafik in Abbildung 44 zeigt die Kalibration des Messwertes. Das Ergebnis weist eher auf die Spät- als auf die Frühawarenzeit hin. Spätere Nachforschungen im Inventarbuch der Anthropologischen Abteilung des Naturhistorischen Museums in Wien ergaben, dass dort schon ein Fehler registriert worden war, nämlich dass unter Grab 1 ein Männerskelett inventarisiert worden war, was mit der Bemerkung „es handelt sich möglicherweise um eine Skelettvertauschung“ kommentiert worden war.

⁹² Selbstverständlich gibt es hier positive Ausnahmen, wie beispielsweise das Oxforder AMS Labor. Nicht alle, aber viele Ergebnisse aus Oxford werden in Archaeometry publiziert und sind auch im Internet zumindest mit einer Grundinformation zugänglich: http://hercules.oucs.ox.ac.uk/~orau/dl_index.html. Eine so vorbildliche Datenpublikation, vielleicht mit noch mehr archäologischer Information würden wir uns allgemein wünschen. Denn die publizierten Daten sind derart auf die verschiedensten Zeitschriften verstreut, dass ihre Sammlung einen unnötigen Zeitaufwand darstellt. Vor allem, wenn man bedenkt, dass die Auftraggeber von ¹⁴C-Messungen also die Archäologen, diese ja doch großteils aus öffentlichen Geldern finanzieren.

Abbildung 44, Kalibration einer Probe aus dem frühawarenzeitlichen Frauengrab 1 von Münchendorf.



Ein anderes Beispiel ist die Datierung des awarischen Khaganengrabes von Kunbábony (siehe den Ausschnitt des Fundmaterials auf Tafel 63). Hier wurden uns ein Tierknochen und 3 Wirbelknochen vom menschlichen Skelett geschickt. Dazu kommt eine Tierknochenprobe aus Grab 2.

Texttabelle 13, Datierung von 5 Proben, 4 die angeblich aus dem Khaganengrab von Kunbábony stammen und eine aus Grab 2.

Labor	Nummer	Kunbábony Komplex	Alter BP	σ	Knochen
VERA	884	Khagan	791	41	Wirbel ovis
VERA	2287	Khagan	735	38	Wirbel homo
VERA	2285	Khagan	1047	40	Wirbel homo
VERA	2286	Khagan	1313	46	Wirbel homo
VERA	885	2	1460	42	Wirbel ovis

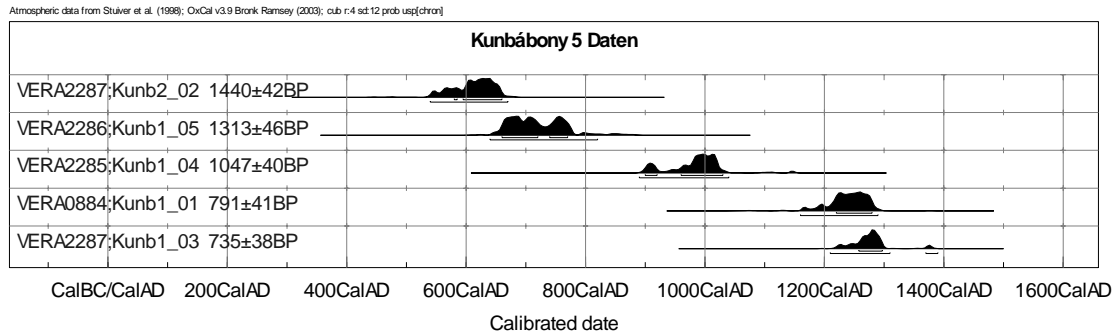
Die Darstellung der Kalibrationsergebnisse zeigt, dass zwei Proben um etwa 1250! n. Chr. datieren, eine um 1000 und eine nach 650 n. Chr. Die archäologisch jüngere Probe aus dem Grab 2 wäre dabei noch älter (ca. um 630) als die älteste Probe des Khaganengrabes.⁹³ Damit werden alle ¹⁴C-Datierungen, die wir vom Khaganengrab besitzen, ad absurdum geführt. Die drei Gruppen überlappen sich nicht einmal im 2- σ -Bereich, sodass mit Sicherheit gesagt werden kann, es wurden nicht zusammengehörige Proben eingesandt. Lediglich die Datierung des Grabes 2, das auch regulär ausgegraben werden konnte, scheint stimmig zu sein. Liest man den Fundbericht von Elvira Tóth,⁹⁴ so wird bald klar, dass im Khaganengrab keiner dieser Knochen „in situ“ bei einer Ausgrabung gefunden worden war. Das Khaganengrab war bei Bauarbeiten zerstört worden, der Großteil des Fundmaterials wurde von den Arbeitern übergeben und die Knochen waren als Streufunde im Bereich der Sandgrube zu Tage getreten. Ich

⁹³ TÓTH Elvira, HORVÁTH Attila 1992, Kunbábony. Das Grab eines Awarerhaganen. Kecskemét, 295p. Grab 2 war beraubt, im Gegensatz dazu dürfte das Khaganengrab vor der Störung durch die Sandgrube unberaubt gewesen sein. Wenn man annimmt, dass die Beraubungen frühestens nach 626, dem Zeitpunkt der vernichtenden Niederlage vor Konstantinopel, eingesetzt haben, dann müsste das Kaganengrab davor in die Erde gekommen sein. Damit die Räuber nur Grab 2 plündern konnten, weil sie Grab 1 nicht mehr erkannten, musste schon einige Zeit vergangen sein.

⁹⁴ TÓTH Elvira, HORVÁTH Attila 1992, s. a. a.O.

bin sicher, wenn man an den menschlichen Wirbeln „ancient DNA“ untersuchte, würde sich herausstellen, dass sie von drei verschiedenen Individuen stammen.

Abbildung 45, Datierung von 5 Proben, 4 die angeblich aus dem Khaganengrab von Kunbábony stammen und eine aus Grab 2.



Fehler können auch bei der Probennahme auftreten. Eine direkte Beschriftung am Knochen empfiehlt sich nicht, weil durch die Tusche oder jeden anderen Farbstoff fremder Kohlenstoff auf die Probe gebracht werden könnte, der möglicherweise bei einer chemischen Vorbehandlung der Probe nicht mehr abzutrennen ist. Daher werden die Proben in Probenflaschen oder in kleine Plastiksäckchen gesteckt und mit Etiketten versehen. Werden die Proben herausgenommen und später wieder hineingesteckt, kann es zu Verwechslungen kommen.

Auch die Arbeiten bei der Probenvorbehandlung im Labor mit ihren zahlreichen Zwischenschritten bieten immer Möglichkeiten zur Probenvertauschung. Nur wirklich sorgfältiges Arbeiten kann diese Fehler ausschließen.

Die letzte Fehlermöglichkeit besteht darin, dass die Proben an eine falsche Position des Probenrades der AMS-Anlage gesteckt werden.

Dass letztlich ein „richtiges“ Ergebnis herauskommt, hängt also von einer ganzen Kette von Arbeitsvorgängen ab und „die Kette ist nur so gut wie ihr schwächstes Glied“.

Bei so vielen Fehlermöglichkeiten ist es also nicht erstaunlich, dass viele ¹⁴C-Ergebnisse nicht publiziert wurden, weil irgendwo eine Schwachstelle war.

Im Rahmen unseres ¹⁴C-Projektes datierten wir 985 Proben, davon entsprachen 870 (=88,32%) Proben der archäologischen Erwartung, 115 (=11,68%) nicht. Das ist wohl ein besserer Schnitt, als im Allgemeinen bei den meisten ¹⁴C-Messungen erreicht wird.

Texttabelle 14, Datierung entspricht archäologischer Erwartung.

Datierung entspricht archäologischer Erwartung	Anzahl	Prozentsatz
nein	115	11,68
ja	870	88,32
Gesamt	985	100,00

Eines sollte man daraus noch lernen: Ein einzelnes Messergebnis kann kaum zu sinnvollen Ergebnissen führen, sinnvoll sind nur ganze Datenserien, vor allem, wenn diese dann mit modernen Auswertemethoden mittels Bayes'scher Statistik „im archäologischen Kontext“ zusammen ausgewertet werden können.