

TEKTONISCHE REKONSTRUKTION VON BOHRPROFILIEN AUS DEM GRAZER PALÄOZOIKUM (SCHÖNBERG-BOHRUNGEN, PASSAILER GRUPPE) MIT HILFE VON ZEITREIHENANALYSEN

K. STATTEGGER, Graz

Zusammenfassung

Mit Hilfe von Zeitreihenanalysen (Kreuzkorrelations-, Spektralanalyse) werden 6 Bohrprofile aus dem Grazer Paläozoikum (Schönbergbohrungen, Passailer Gruppe) hinsichtlich der Erfassung tektonischer Strukturen untersucht. Der methodische Ansatz geht davon aus, daß nach einer Segmentierung von Profilen die Kreuzkorrelationsanalyse der einzelnen Abschnitte eines Profiles charakteristische Verteilungsmuster ergibt, die man als Schichtwiederholungen oder Verfaltungen in der Größenordnung der Segmente oder darüber interpretieren kann. Kleinere tektonische Strukturen können mit Spektralanalysen erfaßt werden. Die Ergebnisse führen zum tektonischen Modell einer NW-vergenten Einengungstektonik, bei der mit steiler Lagerung im oberen bzw. SE-Teil des Bohrareals Bruchtektonik, im tieferen bzw. NW-Teil Faltentektonik vorherrscht (s. Abb. 5).

1. Einführung

Im Bereich Schönberg-Haufenreith (Passail-SE, Oststmk.) wurden 7 Tiefbohrungen in der Passailer Gruppe (nach EBNER & WEBER 1978) abgeteuft, um Anhaltspunkte über eine Fortsetzung der Blei-Zink-Vorkommen von Haufenreith nach NE zu bekommen (s. Lageskizze in Abb. 1 nach WEBER 1978). Die Untersuchungsergebnisse mit den Bohrprofilen sind in WEBER (1978) zusammengefaßt. Die Schichtfolge besteht aus epimetamorphen vulkanogenen und klastischen teilweise leicht karbonatischen Gesteinen, die als Grünschiefer, Phyllite, Karbonatphyllite und Schwarzschiefer vorliegen. Darin sind vereinzelt Kalkmarmore und geringmächtige Quarz-Karbonatlagen eingeschaltet. Der tektonische Bau wird als Muldenstruktur mit nordwestvergenter Überfaltungs- und Einengungstektonik interpretiert.

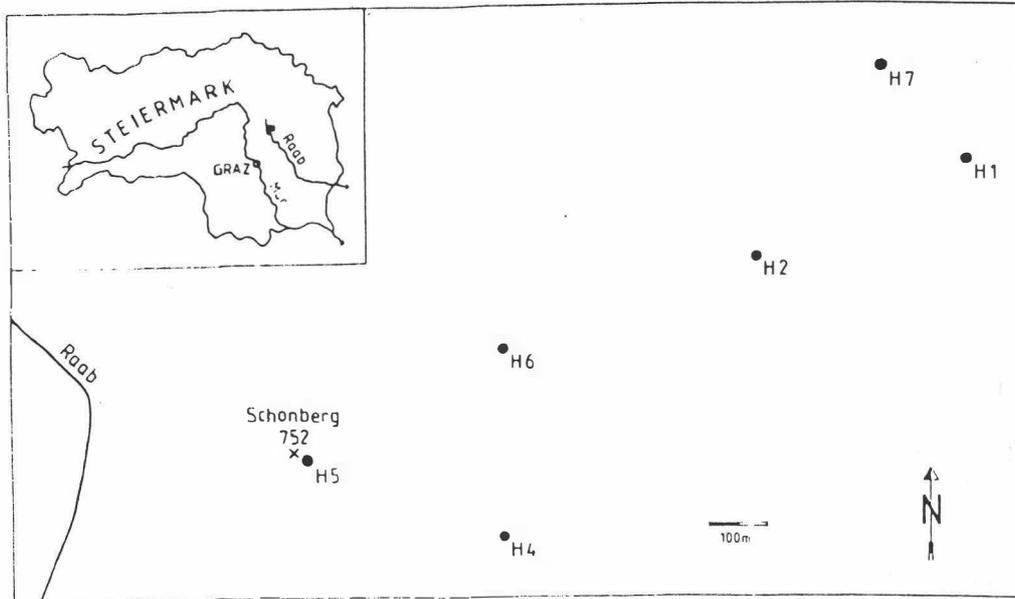


Abb. 1: Lageskizze des Bohrareals mit den Bohrungen H1, H2, H4, H5, H6, H7.

Da eine tektonische Analyse dieses Gebietes auch für weitere Teile des Grazer Paläozoikums von Bedeutung ist (vgl. FLÜGEL 1975 cum. lit., 1980, 1981), sowie für Explorationsarbeiten unter Annahme einer stratiformen Vererzung (vgl. TUFAR 1972, WEBER 1977, 1978), wurde der Versuch unternommen, mit statistischen Methoden eine tektonische Rekonstruktion der Bohrprofile zu erstellen. Aus geochemischen Analysen der Elemente Blei, Zink, Calcium, Magnesium, Eisen, Mangan und Barium, die in den Bohrkernen etwa im Meterabstand durchgeführt wurden, insgesamt 3.600 Proben, stand ein umfangreiches Datenmaterial ^{+) zur Verfügung, das mit Methoden der Auto- und Kreuzkorrelations- sowie der Spektralanalyse statistisch ausgewertet wurde.}

^{+) Die Geochemiedaten wurden in dankenswerter Weise von der Bleiberger Bergwerks-Union zur Verfügung gestellt.}

2. Methodik

2.1. Datenstrukturierung

Als Rohdaten lagen die bereits erwähnten geochemischen Analysenwerte von Proben vor, die etwa im Meterabstand entnommen wurden. Auf Grund der großen Datenmenge beschränkten sich die Berechnungen auf die lithologisch sensitiven Elemente Ca und Fe und die verzugs-sensitiven Elemente Pb und Zn, wobei die Analysendaten als diskrete Werte der Zufallsvariablen Ca, Fe, Pb und Zn behandelt wurden.

Der erste Schritt für eine Auswertung besteht darin, gleiche Abstände zwischen den einzelnen Datenpunkten zu ermitteln, um Ungenauigkeiten bei der Probennahme auszugleichen und äquidistante Datenpunkte im Abstand von genau einem Meter für jede geochemische Variable zu erhalten. Dies geschieht durch einfache Interpolation in Abhängigkeit von der Verteilungsform der Variablen (vgl. DAVIS 1973). Nach dieser Prozedur standen insgesamt 3.298 Datenpunkte aus 6 Profilen (Bohrungen H 1, H 2, H 4, H 5, H 6, H 7) für Zeitreihenanalysen zur Verfügung. Das Profil H 3 blieb wegen der im Vergleich zu den anderen Profilen wesentlich geringeren Bohrmeteranzahl unberücksichtigt.

2.2. Auto- und Kreuzkorrelationsanalyse

Zur Analyse von äquidistanten Meßreihen sind Auto- und Kreuzkorrelationsanalysen geeignet (s. DAVIS 1973, SCHWARZACHER 1975). Dabei wird eine Meßreihe gegen sich selbst bzw. andere Meßreihen in konstanten Abständen bis zu einem festgelegten Maximalbetrag verschoben und Auto- bzw. Kreuzkovarianz und zugehörige Korrelationskoeffizienten berechnet. Die Korrelationskoeffizienten können auf ihre Signifikanz überprüft werden (vgl. BRANDT 1968).

Die Anwendung von Autokorrelationsanalysen erfolgt bei der vorliegenden Problemstellung in der Weise, daß die Meßreihe eines Profils für jeweils eine Variable sukzessive um einen Meßpunkt, d.h. um einen Meter, gegen sich selbst verschoben wird. Bei der Kreuzkorrelationsanalyse wird ein Profil in einzelne Segmente zerlegt und diese paarweise gegeneinander verschoben. Zur Erfassung tektonischer Strukturen werden folgende Überlegungen angestellt:

(1) Eine normale Schichtfolge hat keine echten positiv oder negativ signifikanten Auto-(Kreuz)korrelationen, außer bei symmetrischem oder gerichtetem (Trend) Aufbau einer Schichtfolge, vgl. (4).

(2) Schichtwiederholungen sind durch positive Auto-(Kreuz)korrelationen gekennzeichnet. Negative Korrelationen können auftreten, wenn bei symmetrischen oder gerichteten Schichtfolgen Anfangs- mit Endteilen oder umgekehrt verglichen werden. In beiden Fällen bewegen sich die signifikant korrelierten Segmentpaare bei hinreichender Länge der Schichtfolge in Richtung zunehmender Tiefe. Ähnliche Effekte können sich bei Verfaltungen mit zerscherten oder amputierten Falten-schenkeln ergeben.

(3) Verfaltungen mit normal- und invers liegenden Falten-schenkeln haben negative oder keine signifikanten Auto-(Kreuz)korrelationseffizienten. Die signifikant korrelierten Segmentpaare sind symmetrisch zum Falten-scheitel angeordnet, wenn sich die Falten-schenkel über mehrere Segmente erstrecken.

(4), (2) und (3) können durch eine symmetrische oder gerichtete Schichtfolge weitgehend verschmiert werden, was zu negativen Scheinkorrelationen bei (2) und positiven bei (3) führen kann.

(5) Scheinkorrelationen können vermieden werden, indem der symmetrische oder gerichtete Bereich in einem Segment erfaßt wird oder in mehreren benachbarten Segmenten, die einander zu großen Teilen überlappen (s. Abb.2).

(6) Segmente, in deren mittlerem Teil eine Störung oder ein Faltenscheitel auftritt, können positiv miteinander korreliert sein.

(7) Benachbarte Segmente, die eine Schichtfolge bilden, haben die gleichen signifikanten Korrelationen zu einer anderen Gruppe von benachbarten Segmenten, welche die gleiche Schichtfolge aufbauen.

(8) Eine tektonische Struktur muß für verschiedene Variablen gleiche Ergebnisse liefern, unabhängig von den Korrelationen der Variablen untereinander, sofern diese lithologische Indikatoren darstellen.

Da erste Testläufe in den einzelnen Gesamtprofilen keine brauchbaren Ergebnisse lieferten, wurden die Profile in einzelne gleich lange Segmente, die einander weitgehend überlappen (s. Abb. 2), zerlegt und die Testläufe wiederholt. Nach mehreren Versuchen ergab sich eine optimale Profilabschnittslänge von 88 m. ⁺⁾ Die Profilabschnitte wurden so angeordnet, daß jeder Abschnitt gegenüber dem vorhergehenden 22 m versetzt ist, woraus sich für die einzelnen Profile eine Aufgliederung 1 - 88 m, 23 - 110 m, 45 - 132 m usw. ergibt. Damit ist jedes Profil in 19 oder mehr Segmente (abhängig von der Profillänge) gegliedert, die über Kreuzkorrelationsanalysen beliebig miteinander korreliert werden können. Die Maximalverschiebung beträgt 22 m, da ab diesem Betrag ein Segment mit dem vorhergehenden bzw. mit dem folgenden identisch wird (s. Abb. 3). Mit einer Verschiebung von max. einem Viertel der Segmentlänge stehen mindestens 66 Wertepaare für die Korrelationsberechnungen zur Verfügung, was für eine Signifikanzprüfung ausreichend ist.

⁺⁾ Die Zahl 88 resultiert aus der Datenorganisation, da elf Werte pro Lochkarte für EDV abgelocht wurden.

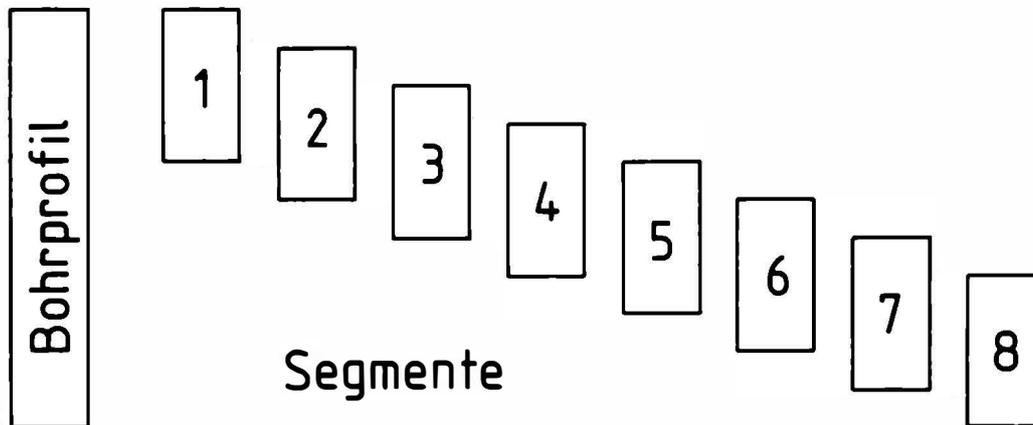


Abb. 2: Segmentierung eines Profils

Für jedes Paar von Segmenten gibt es zwei Möglichkeiten einer Verschiebung, wobei jeweils ein Segment fix bleibt und das andere immer in die gleiche Richtung geschoben wird. Es wird nur jene Verschiebungsrichtung untersucht, bei der das verschobene Segment gegen zunehmende Tiefe bewegt wird. Durch die spezielle Anordnung der Segmente können damit alle möglichen Verschiebungen simuliert werden (vgl. Abb.3). Positive oder negative Ähnlichkeiten zwischen einzelnen Segmenten können so rechenzeitsparend eruiert werden.

Die Ergebnisse der Korrelationsberechnungen lassen sich in einer Profil-Segment-Korrelations-Matrix darstellen, in deren Spalten fixe Segmente und den Zeilen verschobene Segmente stehen. Signifikante Korrelationen werden mit +, - für 99% Sicherheitsschwelle und +, - für 95% Sicherheitsschwelle markiert. Aus der Art der Segmentierung ergeben sich dabei für Schichtwiederholung und -ver-

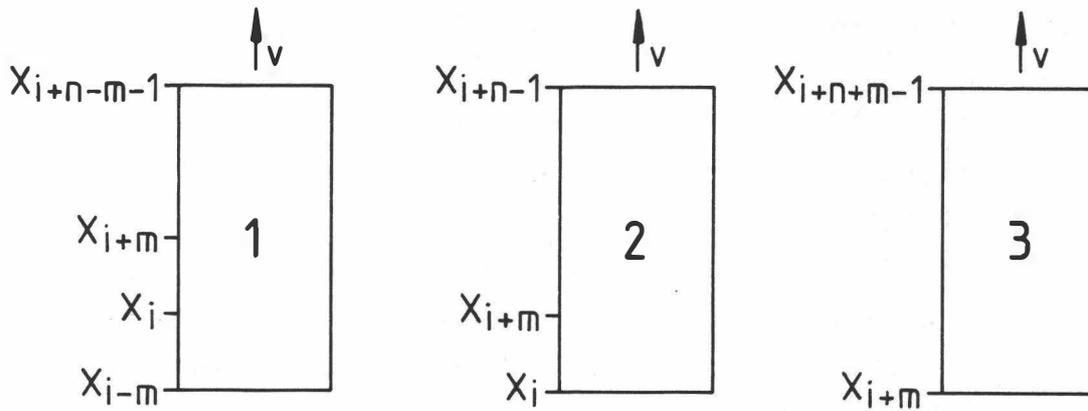


Abb. 3: Kreuzkorrelation von Segmenten eines Profiles

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{i-m-1}, x_{i-m+1}, \dots, x_{i-m+n-1} \\ x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n-1} \\ x_{i+m}, x_{i+m+1}, \dots, x_{i+m+n-1} \\ x_{i+m_q}, x_{i+m_q+1}, \dots, x_{i+m_q+n-1} \end{array} \right\}$$

$$i = 1, 2, \dots, t-n+1$$

$$m = \frac{n}{4}$$

$$q = 1, 2, \dots, \frac{t-(n-m)}{m}$$

$\frac{t-(n-m)}{m}$ = Anzahl der Segmente

$$\begin{aligned} x_i < x_{i+1} < \dots < x_{i+n-1} \\ x_{i+1} - x_i = x_{i+n-1} - x_{i+n-2} = \text{const.} \end{aligned}$$

$$r_{x_i, x_{i+m_q+v}} = \frac{\sum_{j=1}^{n-v} (x_j - \bar{x})(x_{j+m_q+v} - \bar{x}')}{\left[\sum_{j=1}^{n-v} (x_j - \bar{x})^2 \sum_{j=1}^{n-v} (x_{j+m_q+v} - \bar{x}')^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{für } \bar{x} = \frac{1}{n-v} \sum_{j=1}^{n-v} x_j$$

$$j = 1, 2, \dots, t$$

$$\bar{x}' = \frac{1}{n-v} \sum_{j=m_q+v+1}^n x_j$$

$$v = 1, 2, \dots, m$$

- x_i = Datenpunkte
- n^i = Anzahl der Datenpunkte in einem Segment
- m = Versetzungsbetrag zwischen den Segmenten
- t = Anzahl der Datenpunkte in einem Profil
- v = Verschiebungsbetrag
- \uparrow = Verschiebungsrichtung

faltung neben dem Vergleich einzelner Segmente typische Verteilungsmuster der signifikanten Korrelationen an mehreren aufeinander folgenden Segmenten (s. Abb. 4): Schichtwiederholungen zeigen einen diagonalen Verlauf der signifikanten Korrelationen von links oben nach rechts unten, wobei sowohl positive als auch negative Korrelationen möglich sind, die signifikant korrelierten Segmentpaare bewegen sich in Richtung größerer Tiefe. Bei Verfaltungen sind die negativ signifikanten Korrelationen diagonal von rechts oben nach links unten angeordnet, die korrelierten Segmentpaare liegen symmetrisch zum Faltenscheitel.

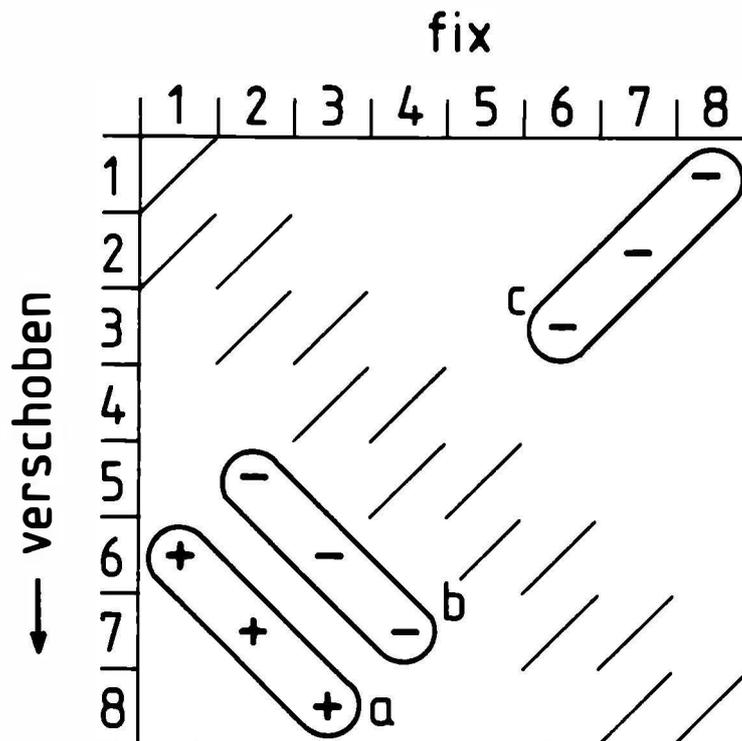


Abb. 4: Profil-Segment-Korrelationsmatrix, Beispiel für 8 Segmente. + = positiv, - = negativ signifikante Korrelationen. a: Muster für Schichtwiederholung. b: Schichtwiederholung oder Verfaltung mit Störung, Anfangsteil wird mit Endteil einer Schichtfolge verglichen oder umgekehrt. c: Verfaltung. /: Identität von Segmenten oder Annäherung daran durch Verschiebung

2.3. Spektralanalyse

Mit spektralanalytischen Methoden können Periodizitäten in einer Schichtfolge erfaßt werden. Die besten Aussagen liefern Amplituden - Spektrum mit Kohärenzanalyse für verschiedene Variablen als Signifikanztest auf der Grundlage einfacher Fourier-Transformationen von Datensequenzen (zur Theorie s. AGTERBERG 1974 cum lit., JENKINS & WATTS 1968, SCHWARZACHER 1975 cum lit.). Mit diesen Methoden soll untersucht werden, ob zu den tektonischen Strukturen, die sich aus Auto- und Kreuzkorrelationsanalysen ergeben, noch zusätzliche Schichtwiederholungen im kleinen Maßstab, z.B. Isoklinalfalten, auftreten, die sich beim Zusammensetzen größerer Profilabschnitte nachteilig auswirken können.

2.4. Rechenprogramme

Alle Berechnungen wurden mit Programmen aus der Programmbibliothek STAT-PACK, Univac Large Scale Systems 1972, mit den Algorithmen von PARZEN 1964 ausgeführt.

3. Ergebnisse

3.1. Wahl der lithologischen Variablen

Vor der Durchführung der Kreuzkorrelationsanalysen an den Segmenten eines Profiles mußte überprüft werden, ob die Elemente Ca, Fe, Pb und Zn als lithologische Variablen angesprochen werden können, d.h. ob sie eng an die Lithologie gebunden sind. Dazu wurden die Korrelationen zwischen den vier Variablen in allen Profilen berechnet. Bei der Abhängigkeit einer Variablen von einer bestimmten Lithologie können signifikant negative Korrelationen zu einer anderen Variablen, die von einer anderen Lithologie abhängig ist, erwartet werden, wenn in einem Profil verschiedene lithologische Typen auftreten. Die Korrelationsmatrices sind in Tab.1 zusammengefaßt. Dabei zeigt sich, daß in allen Profilen die Variablen Ca und Fe negativ signifikant miteinander

Profil H 1				Profil H 2			
	Ca	Fe	Pb		Ca	Fe	Pb
Ca	-			Ca	-		
Fe	-.453	-	-	Fe	-.387	-	
Pb	.079	-.066	-	Pb	-.020	.001	-
Zn	.049	.028	.309	Zn	-.078	.030	.339

Profil H 4				Profil H 5			
	Ca	Fe	Pb		Ca	Fe	Pb
Ca	-			Ca	-		
Fe	-.757	-		Fe	-.369	-	
Pb	-.018	-.007	-	Pb	.371	-.194	-
Zn	-.028	-.002	.898	Zn	-.012	.013	.087

Profil H 6				Profil H 7			
	Ca	Fe	Pb		Ca	Fe	Pb
Ca	-			Ca	-		
Fe	-.362	-		Fe	-.289	-	
Pb	.144	-.135		Pb	.253	-.017	-
Zn	.049	-.093	.261	Zn	.064	-.026	.039

Tab. 1: Korrelationsmatrices der geochemischen Variablen Ca, Fe, Pb und Zn für die Profile H 1, H 2, H 4, H 5, H 6 und H 7. Signifikante Korrelationen (99% Sicherheitsschwelle) sind unterstrichen.

korreliert sind, während sich Blei und Zink weitgehend indifferent zu Calcium und Eisen verhalten. Daraus folgt, daß nur Ca und Fe lithologische Variablen darstellen, die als Karbonat- bzw. Klastizitäts- und (oder) Vulkanit-Indikatoren für die epimetamorphe vulkanoklastische teilweise mergelige Schichtfolge interpretiert werden. Diese Annahme wird durch den Vergleich der Lithologie der Bohrprofile mit den Geochemiedaten weitgehend gestützt (s. WEBER 1978). Wie weit diese Korrelationsuntersuchungen gegen die Hypothese einer schichtgebundenen Vererzung sprechen, kann in diesem Rahmen nicht diskutiert werden. Ein weiteres Kriterium ergeben Auto-Korrelationsanalysen der einzelnen Elemente über die Gesamtprofile: Während in allen Profilen bei Ca und Fe ein Einflußbereich von mindestens 35 Meter gegeben ist, sind die aufeinanderfolgenden Daten von Pb und Zn weitgehend unkorreliert (weitere Erläuterungen dazu in STATTEGGER 1982).

3.2. Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalysen

Die Berechnungen wurden an den segmentierten Profilen den Variablen Ca und Fe durchgeführt. Die signifikanten Korrelationen sind in den Profil-Segment-Korrelations-Matrices (s. Tab.2-7) enthalten. Die sich daraus ergebenden tektonischen Abschnitte wurden wieder zu schematischen Profilen zusammengesetzt (s. Abb.5-6). In den rekonstruierten Profilen scheint die Minimalmächtigkeit der Schichtfolge in Abhängigkeit von Lagerung und Verlauf des Bohrprofiles auf. Das Einfallen der einzelnen Abschnitte wurde über die Einzelmessungen der Bohrprofile gemittelt, bzw. bei allmählicher Verflachung oder Vesteilung innerhalb einzelner Abschnitte eine leichte Verfaltung eingezeichnet. Die Einfallsrichtung ergibt sich - vorwegnehmend - aus der räumlichen Anordnung und dem Vergleich der tektonischen Struktur aller Profile (s. Kap.3.3.).

Profil H 1 (Tab.2, Abb.5)

Der höher gelegene obere Teil des Profils ist bruchtektonisch in vier Abschnitte zerlegt. Die höheren Einzelabschnitte sind gegen die tieferen staffelartig nach NW versetzt, wobei Liegend-Hangend-Hangend-Liegend-Teil der Schichtfolge einander abwechseln. Die Bruchflächen fallen nach SE ein. Dieser durch Bruchtektonik geprägte Bereich endet bei einer Tiefe von ca. 365 m. Darunter folgt eine liegende Falte mit einem Faltenscheitel bei ca. 403 m Tiefe, unter dem die Schichtfolge bis zum Profilende invers liegt. Die minimale Mächtigkeit ergibt sich aus dem Bohrprofil mit 75 m.

Profil H 2 (Tab.3, Abb.6)

Den obersten Abschnitt nimmt ein Kalkmarmor ein, dessen Position zur unterliegenden klastischen Schichtfolge nicht eindeutig ist, jedoch erscheint ein sedimentärer Übergang auf Grund der gleich steilen Lagerung wahrscheinlicher. Dieser Bereich wird durch eine SE einfallende Störung bei 209 m Tiefe abgeschnitten und nach NW versetzt. Darunter befinden sich zwei liegende Falten mit Faltenscheiteln bei ca. 353 und ca. 465 m, wobei die Lagerung zwischen den beiden Scheiteln invers ist. Die Rekonstruktion endet an einer Störungszone ab 669 m Tiefe. Eine Zuordnung der letzten Bohrmeter ist nicht mehr möglich. Die Mächtigkeit der Schichtfolge beträgt mindestens 120 m.

Profil H 4 (Tab.4, Abb.6)

Ein Kalkmarmor im obersten Teil kann ähnlich wie im Profil H 2 nur bedingt zugeordnet werden. Es folgen zwei durch SE fallende Störungen bei 132 und 241 m nach NW versetzte Bereiche mit flacher bis mittelsteiler Lagerung. Den unteren Teil bilden zwei liegende Falten, der Schenkel zerschert und amputiert sind. Die Faltenscheitel befinden sich bei ca. 309 und bei ca. 370 m Tiefe, der Bereich dazwischen liegt invers. Die Schichtfolge ist mindestens 114 m mächtig.

Profil H 5 (Tab.5, Abb.5)

Die tektonische Struktur des Profiles besteht aus drei liegenden Falten. Es beginnt in einem inversen Faltenschenkel mit einem Faltenscheitel bei ca. 134 m. Der nachfolgende normale Faltenschenkel leitet in die nächste Falte über, die ab dem Faltenscheitel bei ca. 309 m wieder einen inversen Schenkel besitzt, der in die dritte Falte überleitet. Diese hat ihren Faltenscheitel bei ca. 396 m Tiefe, der nachfolgende Teil bis zum Profilende bei 495 m ist mit mittelsteilem Einfallen normal gelagert. Die minimale Mächtigkeit beträgt 104 m.

Profil H 6 (Tab.6, Abb.6)

Das Profil ist ähnlich wie Profil H 5 aus drei liegenden Falten aufgebaut, wobei die Faltenschenkel zerschert und amputiert sind. Der oberste Abschnitt liegt invers und kehrt sich bei einem Faltenscheitel bei ca. 128 m Tiefe in Normallagerung um. Dieser normal liegende Schenkel wird bei ca. 232 m von einer SE einfallenden Störung abgeschnitten und leicht nach NW aufgeschoben. Die Störung liegt im Bohrprofil im Scheitel der nächsten Falte. Es folgt ein inverser Schenkel, der bei ca. 353 m an einer NW fallenden Störung abgesichert und amputiert ist. Im Bohrprofil liegt hier der Scheitel der dritten Falte, unter dem ein normal liegender Schenkel den tiefsten Abschnitt bildet. Aus dem Profil ergibt sich die Mindestmächtigkeit von 94 m.

Profil H 7 (Tab.7, Abb.5)

Den oberen Abschnitt bilden bruchtektonisch begrenzte Bereiche mit SE fallenden Störungszonen bei 103 und 195 m Tiefe. Der untere Teil wird von zwei liegenden Falten eingenommen, deren Scheitel sich bei ca. 305 m und 369 m befinden. Dazwischen liegt ein inverser Faltenschenkel. Die Schichtfolge hat eine minimale Mächtigkeit von 106 m.

Tab. 2-7. Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalysen in Form von Profil-Segment-Korrelations-Matrices von Ca und Fe in den einzelnen Profilen. Die Segmente in fixer Position sind in der ersten Zeile und den entsprechenden Spalten, die verschobenen Segmente in der ersten Spalte und den entsprechenden Zeilen angeordnet (vgl. dazu Abb.4). Korrelationen über dem 99% Signifikanzniveau sind mit + und -, Korrelationen über dem 95% Signifikanzniveau mit + und - gekennzeichnet. Zugunsten einer übersichtlichen Darstellung wurde auf die Angabe des Verschiebungsbetrages verzichtet, dieser aber bei der tektonischen Rekonstruktion in den Angaben der Tiefenlage berücksichtigt (s. Abb. 5-6).

H1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1	CaFe																					
2	CaFe	CaFe																				
3	CaFe	CaFe	CaFe																			
4	CaFe	CaFe	CaFe	CaFe																		
5	CaFe	CaFe	CaFe	CaFe	CaFe																	
6	CaFe	CaFe	CaFe	CaFe	CaFe	CaFe																
7	CaFe																					
8	CaFe																					
9	CaFe																					
10	CaFe																					
11	CaFe																					
12	CaFe																					
13	CaFe																					
14	CaFe																					
15	CaFe																					
16	CaFe																					
17	CaFe																					
18	CaFe																					
19	CaFe																					
20	CaFe																					
21	CaFe																					

Tab. 2. Profil H1.

Tab. 3. Profil H2.

H2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
	CaFe																												
1				--	-						+					+	++	-						-					
2			++	++	+++				-			++	+		--	--		-	-	+		+++			-		+	-	
3	+			++	+++							+	-		--	--	--	--		-	++		++	+	-			-	
4	++	++			+-	++		--	-		++	++	+		-	--	--	--		++	++	++	++		-			+	
5	+++	++				++	+	--	-		+++	+				--	--	--		++	++		++	+	-				
6	+++	+	+-						--		+				-	--	-					++	++					-	
7		+		+	+								+				-	-					+						
8			-		-							-				+		+				-							
9	-		-		-										+														
10																+													
11	+		+	+++	+++								+			-	-	-		+	+	+		-					
12		++	++	++	+++												--	--	-		++		+		-			-	
13	+	+		++		+												--		+	++	+							
14	-		-																		-					+			
15		-	-				+						+												+			-	
16	--	--	--	--	--	-			+								+							+				+-	
17		--	--	--	--	-		+			-	-						++	-	-	--	--						+	
18	--	--	--	-	-	-					-	-	-							--	--	--	-						
19	+						+						-																
20		++	+	+														-										-	
21		+++	+++	+				-			+	+	+			-	--	--			+				-			-	
22		+++	+++	+++							+++				-	-	--	-		+				-				-	
23	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+		-			++				--	--	-		+	++			-	-				
24		+	+++	+														-	--										
25	--			-	-	-			+		-			+	+								-	-					
26		--																						-					
27			-																										-
28	-	+			-																						-		

H5

- 119 -
Tab. 5. Profil H5.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	CaFe																					
1		+			-	-			-		+					+		+		+		
2						-			-	--			++		+	+		-			+	
3									--	-		+	+	++				--			+	++
4							-	--	--	-	-		-	+		+	+	-				+
5		-						-	++	+			-		+	-			-			
6									+	+	++				--	+						
7		-					-			+		-	-	+		-	++		-			
8		+		+					-		+	-										
9				++			-					+	--				-					
10	-	--	-	+++	+								-	-	--	+	+	++			-	-
11			--		++		++								--	-	+	++	++			-
12		+				-	-									+		-			++	+
13		+			+																	
14		++	++	-					-	-											++	+
15			+	++	-		-		-	-											+	++
16						--				-	-						-					+
17						+		-	+	-	-				-							
18		-	--	+			+	+	++	+					-							-
19			-		+		+		+	++	+			-	-							
20				-							++											
21	+	+	+		-					--		+		++	++				+			

H6

Tab. 6. Profil H6.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Ca Fe																		
1									++										
2					--	--			+	++					-				
3					--	--	--				++	+		+	-		--		-
4						--			+										
5									-										
6								+		--		++	+	-	+		++		+
7		--	--							--	--		++						+
8												-			-		++		+
9														+					
10	++		+			--													
11		++	++			-	--					+		+	-		-		--
12		+	++			--	--	-								+	--	--	-
13				-			+												-
14		+			-				+										
15								++			+								
16								-					+						
17		-			++	++		++	-	-		--	+		+				+
18							++				--	+							
19			-									-					++		

H7

Tab. 7. Profil H7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
	CaFe																				
1					++												+	++			
2						++															
3																					
4															++						
5															++						
6	++						+			+							+	+			
7	+	+							++												
8								--				++		++		-				-	
9											-		+		++						
10													-			++				+	
11						+								-		+	++	-			
12	+	+			-	+		-						+	+	-	-				
13							+			--	--							--	--		
14										--		+			+		--				
15							+					+	++							-	
16									++	+											+
17					+			--		++	+	--		-							
18						+				++	++	-	--			++					
19																+					

Abb. 5: Tektonische Rekonstruktion von Schichtfolgen aus den Bohrprofilen H1, H5 und H7 in einem schematischen SE-NW Profil, das die verschiedenen tektonischen Strukturtypen zeigt. Profil H5 ist nach NE versetzt. — = Bohrlinie; ↓ = Bereiche mit inverser Lagerung; ----- = Bruchzone. Die Zahlen geben das Niveau über dem Meeresspiegel an.

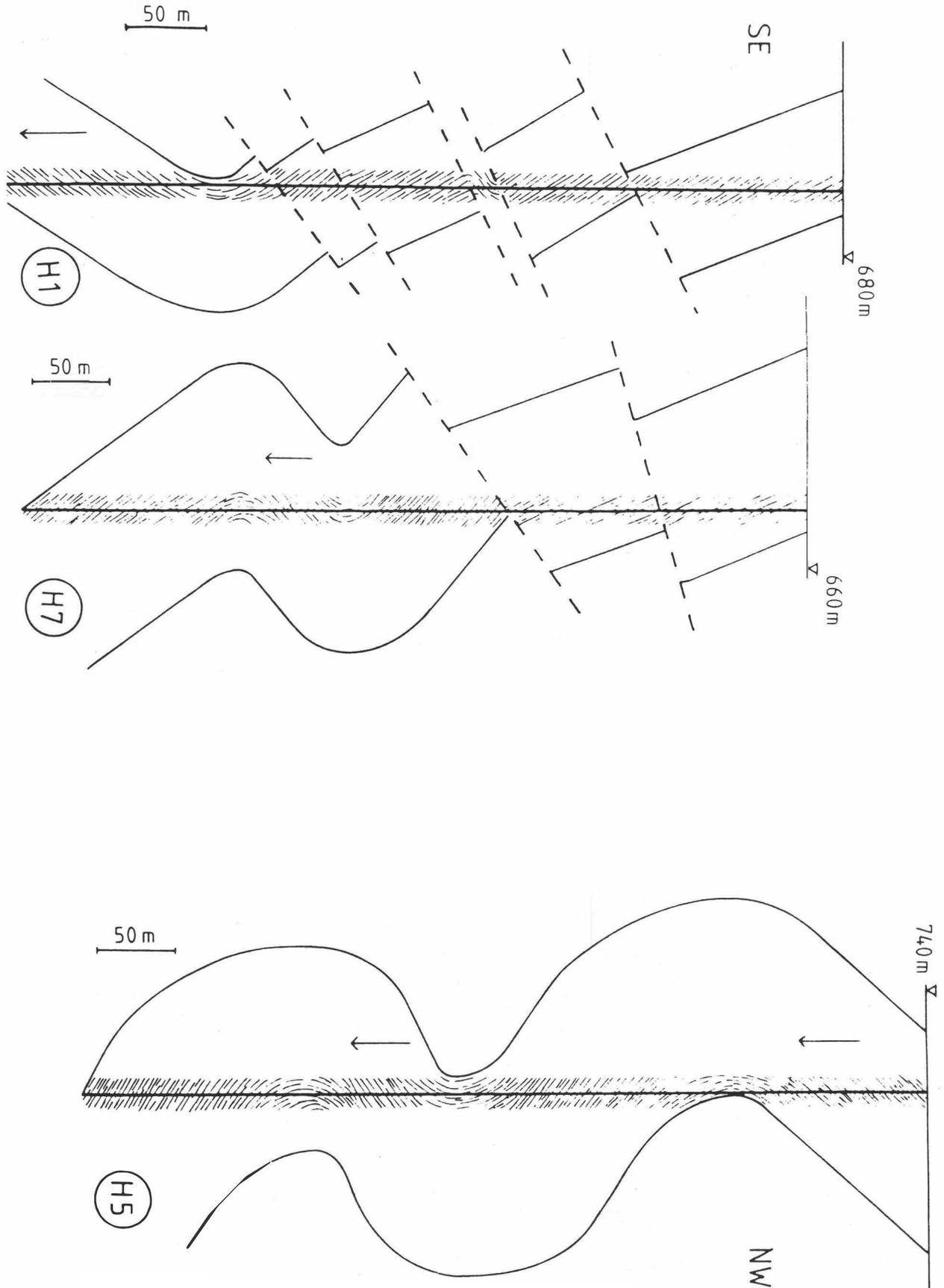
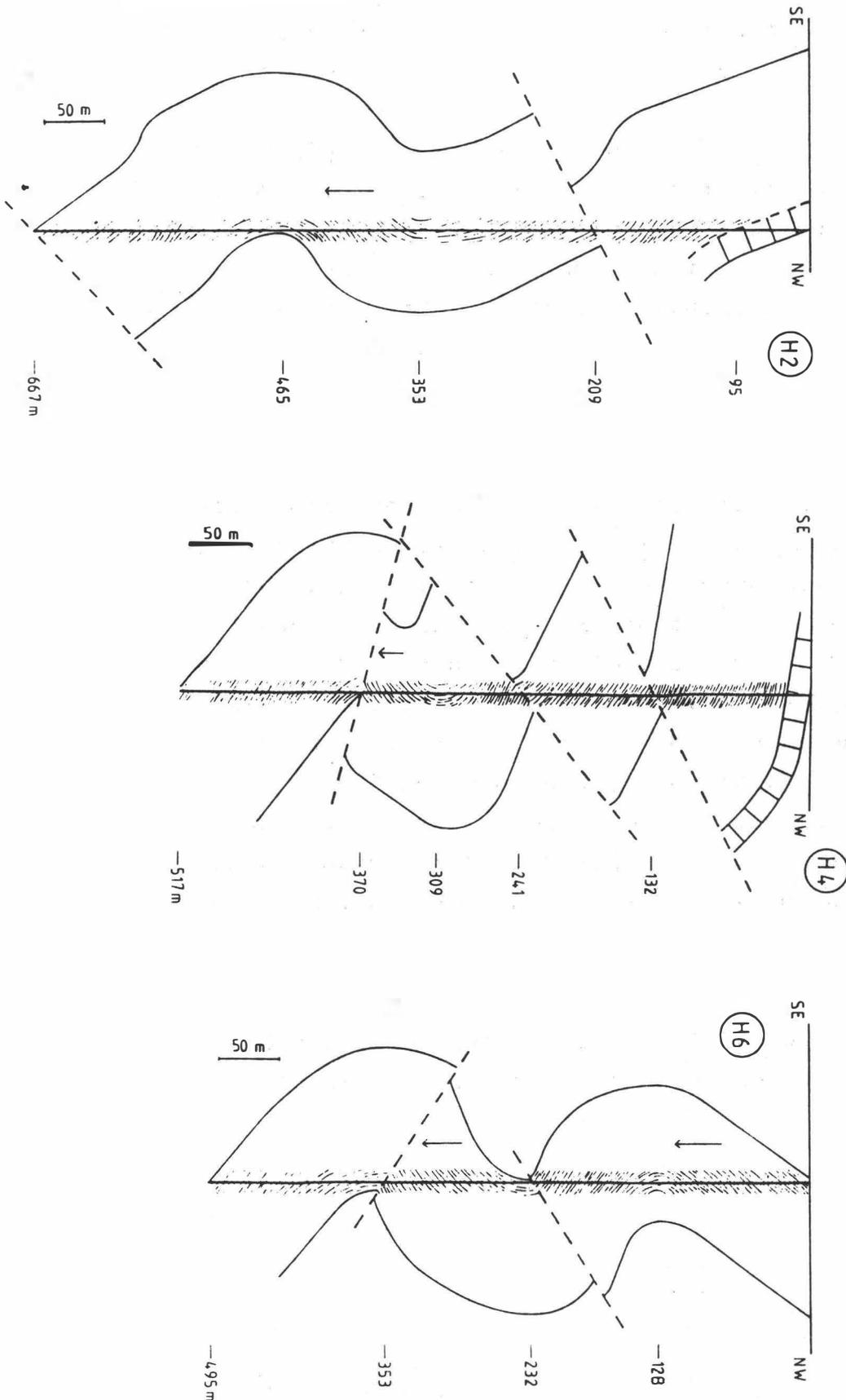


Abb. 6: Tektonische Rekonstruktion von Schichtfolgen aus den Bohrprofilen H2, H4 und H6. — = Bohrlinie; ↓ = Bereiche mit inverser Lagerung; - - - - = Bruchzone. Die Zahlen bedeuten Tiefenangaben.



3.3. Ergebnisse der Spektralanalyse

Mit Fouriertransformationen der Datensätze aus den einzelnen Profilen konnten aus Amplitudenspektrum und Kohärenzanalyse zusätzliche Informationen über kleinmaßstäbliche Schichtwiederholungen gewonnen werden. Die Amplitudenspektren der lithologischen Variablen für die einzelnen Profile zeigt Abb.7.

Erwartungsgemäß sind die niedrigen Amplituden, welche größere Strukturen anzeigen, die in den vorliegenden Profilen jedoch eine große aperiodische Komponente haben, von kleineren periodischen Strukturen in den höheren Amplituden überlagert. Diese periodischen Kleinstrukturen lassen sich tektonisch am besten als Isoklinalfalten, möglicherweise verbunden mit Abscherungen interpretieren.

In allen Profilen treten Falten der Größenordnung 10.5 bis 13 m auf, die durch markante Peaks der entsprechenden Amplituden gekennzeichnet sind. Weiters zeigen die Profile H 1, H 5 und H 6 ein einheitliches Muster mit zusätzlichen Faltendimensionen von 20 - 23.5 und 7 - 8 m. In den Profilen H 2 und H 7 sind noch Faltenstrukturen der Größe 38 - 39 m, 22.5 - 28 m und 7 - 9 m vorhanden. Die Amplitudenspektren für Fe sind ähnlich, teilweise weniger deutlich strukturiert, aus Kohärenzanalysen der Kreuzspektren von Calcium und Eisen ergibt sich ein hohes Maß an Übereinstimmung sämtlicher angeführter Amplituden.

Die mit der Spektralanalyse erfaßbaren, kleineren tektonischen Strukturen weisen auf zusätzliche Komplikationen bei der Rekonstruktion der Bohrprofile hin.

Abb. 7 : Amplitudenspektren der einzelnen Borhprofile für Ca. Auf der Abszisse ist die Frequenz in Metern abgetragen, auf der Ordinate die Höhen der Amplituden A_i . Die Spektraldichtefunktion $f(\omega)$ mit den Amplituden wird aus der Autokovarianzfunktion $C_x(v)$ berechnet (vgl. Abb.3):

$$C_x(v) = \frac{1}{n-v} \sum_{j=1}^{n-v} x_j x_{j+v} \quad \begin{array}{l} v = 0, 1, 2, \dots, m \\ \bar{x} = 0 \end{array}$$

fouriertransformiert:

$$C_x(v) = 2 \int_0^{\pi} \cos v \omega f(\omega) d\omega$$

Für diskrete Werte gilt:

$$f_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} [C_x(0) + 2 \sum_{v=1}^{m-1} C_x(v) \cos \omega v k(u)]$$

mit dem Spektralfenster nach PARZEN 1964:

$$k(u); u = \frac{1}{m}$$

$$\begin{array}{ll} \text{für } k(u) = 1 - 6u^2 + 6u^3 & 0 \leq u \leq 0,5 \\ & - 2(1 - 6u^3) & 0,5 \leq u \leq 1 \\ & = 0 & u \geq 1 \\ & = k(-u) & u \leq 0 \end{array}$$

Daraus errechnen sich die Amplituden A_i mit

$$\frac{1}{2} A_i^2 = \frac{n}{2} \sum_{v=1}^{m-1} C_x(v) \cos \omega_i v k(u)$$

Weitere Erläuterungen sind in STATTEGGER 1982 cum lit. enthalten.

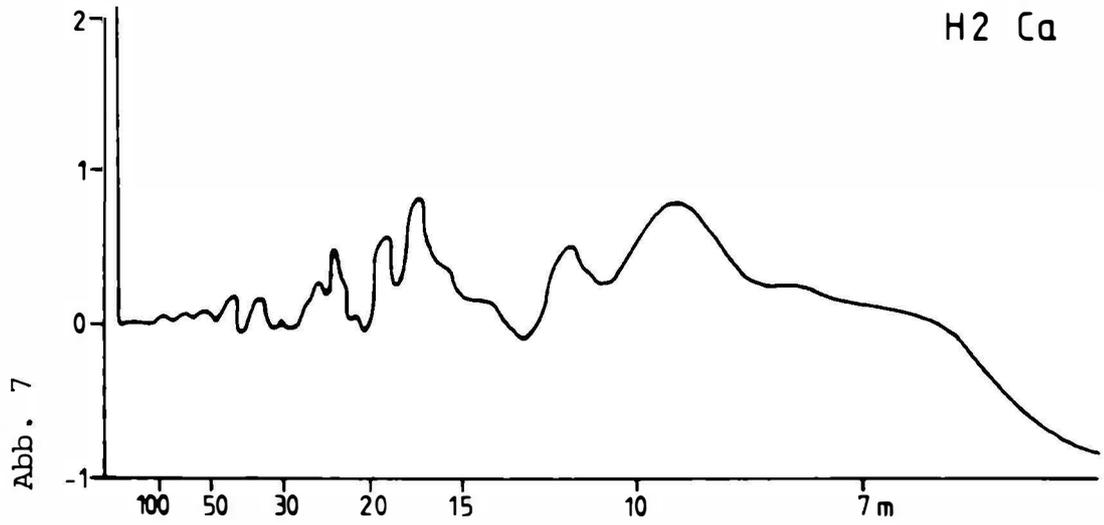
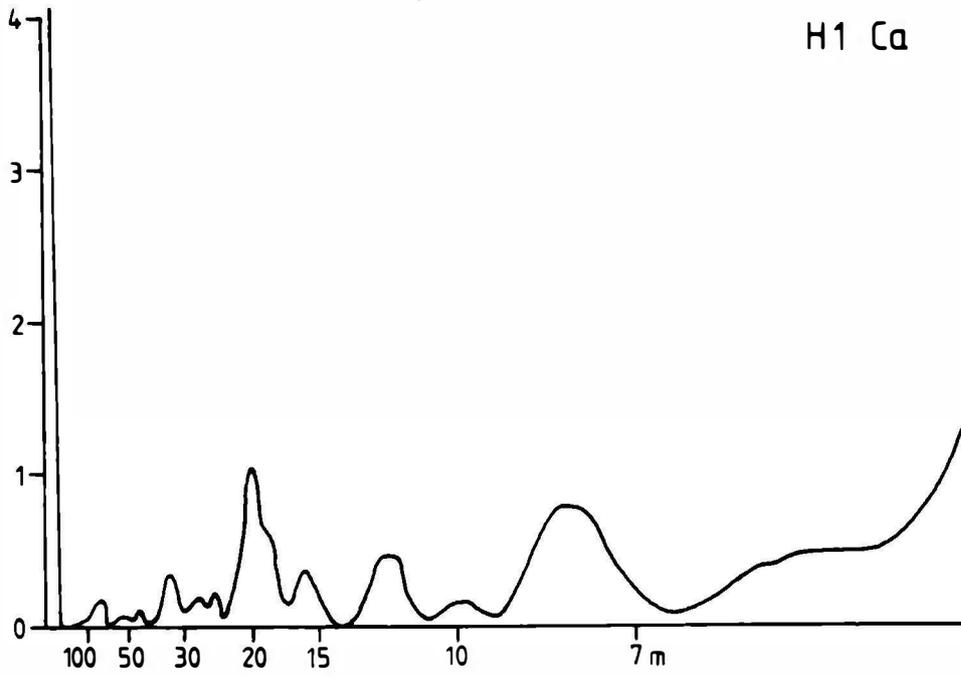
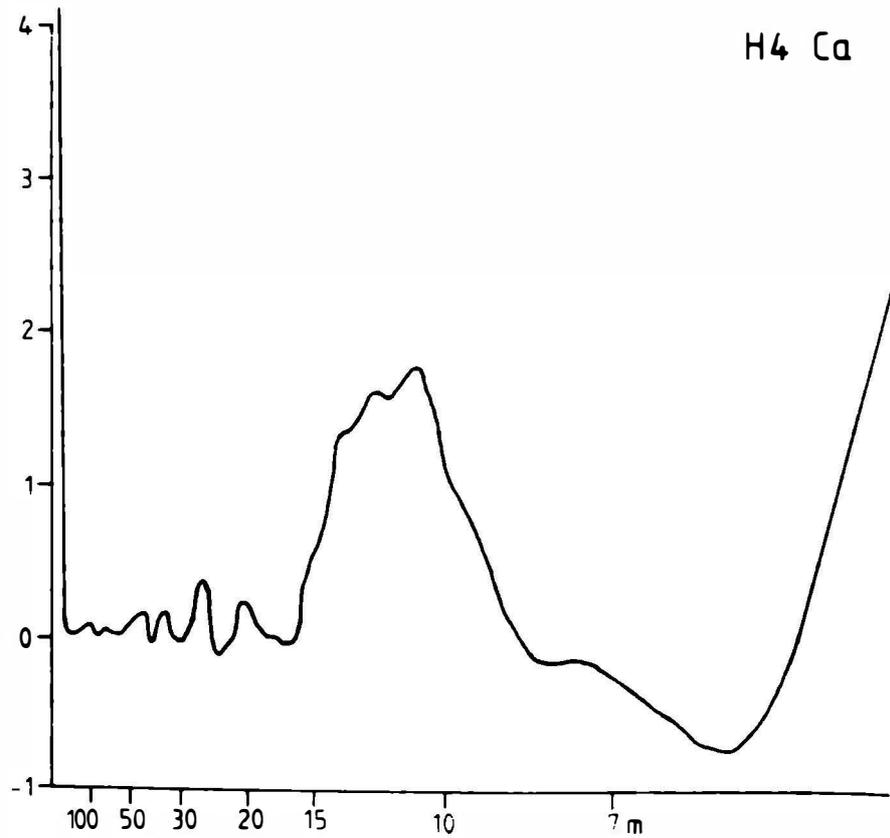


Abb. 7



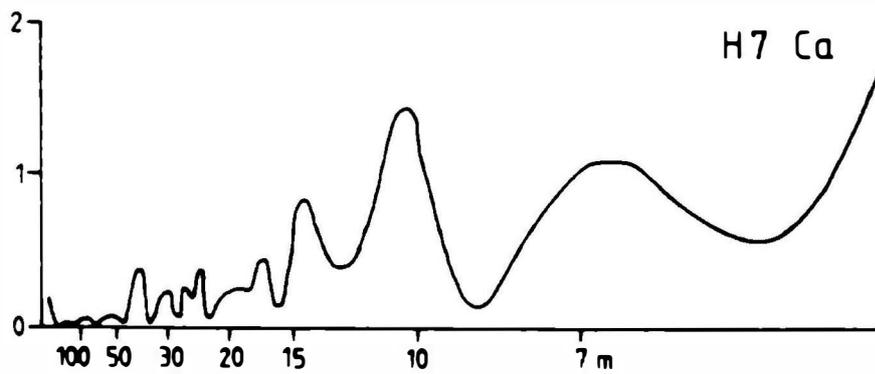
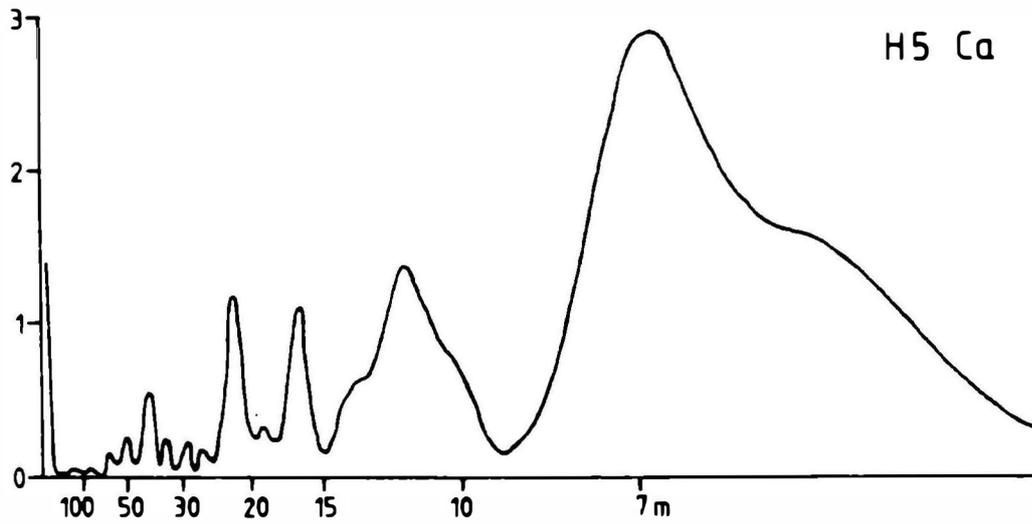
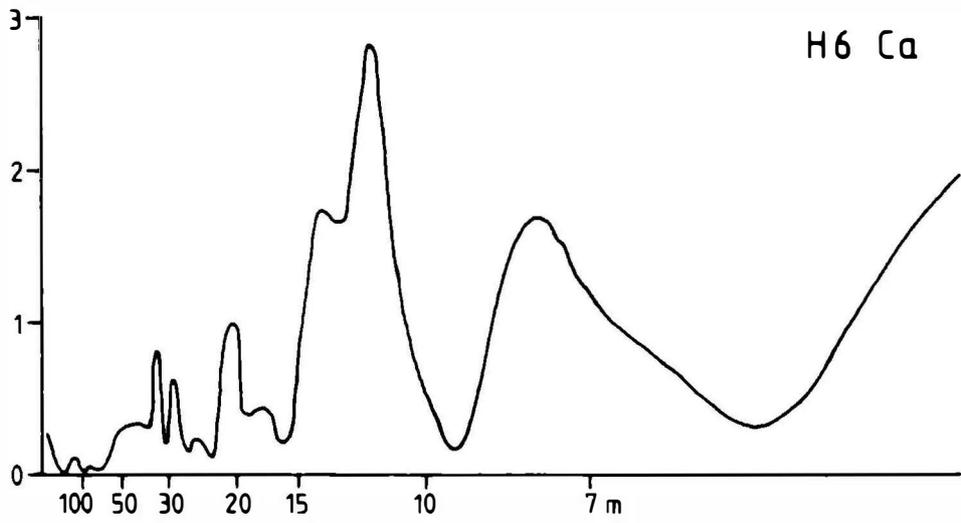


Abb. 7 - Fortsetzung

3.4. Vergleich der Profile bzgl. der tektonischen Strukturen

An den Profilen lassen sich drei tektonische Strukturtypen unterscheiden:

Typ 1 (Prof. H 1):

Überwiegend Bruchtektonik, eine liegende Falte im unteren Teil.

Typ 2 (Prof. H 2, H 4, H 7):

Bruchtektonik im oberen, Faltentektonik mit zwei liegenden Falten im unteren Teil.

Typ 3 (Prof. H 5, H 6):

Faltentektonik mit drei liegenden Falten.

Diese drei Strukturtypen lassen sich nach Abb.1 drei parallel laufenden NE streichenden Zonen zuordnen, die sich in einem NW-SE Profil (Abb. 5) zusammenfassen lassen. Die faltentektonischen Bereiche befinden sich immer unter den bruchtektonischen Bereichen, letztere nehmen von SE nach NW ab. Dies ergibt sich aus den NW gerichteten widersinnigen Versetzungen der Hangend-schollen, wodurch die bruchtektonischen Bereiche gegen NW in immer höhere Niveaus gelangen. Entsprechend nehmen die tiefer gelegenen faltentektonischen Strukturen zu. Bruchtektonische und Faltenstrukturen weisen auf NW gerichtete Einengungstektonik hin. Die bruchtektonische Zerlegung in den höheren Teilen kann mit Überschiebungsvorgängen erklärt werden, deren Wirksamkeit mit zunehmender Tiefe in den unterlagernden Gesteinen abnimmt, die Entstehung der generell steilen Lagerung mit liegenden Falten bleibt offen.

Versuche, verschiedene Profile oder Teile davon miteinander zu korrelieren, erbrachten keine signifikanten Ergebnisse. Das wird als Hinweis auf eine wesentlich größere Gesamtmächtigkeit der Schichtfolge als aus den Profilen ermittelt gewertet.

Die Ähnlichkeit von tektonischen Groß- und Kleinstrukturen zeigt Abb.8, gezeichnet nach einem Aufschlußphoto.

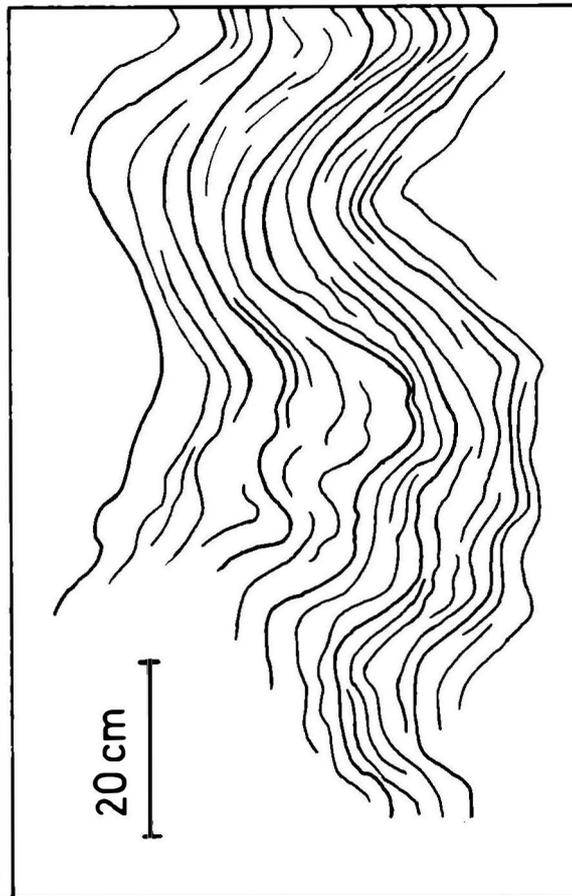


Abb. 8: Tektonische Kleinstrukturen in Phylliten an einem Aufschluß längs der Straße Passail-Arzberg im Raabtal, gezeichnet nach einer Photographie.

Die Ausbildung der beschriebenen tektonischen Strukturen steht im Zusammenhang mit der altalpidischen niedriggradigen Metamorphose der Passailer Gruppe und dürfte nach NEUBAUER (frdl.mündl.Mitt.) postkristallin gegen Ende des Metamorphoseaktes stattgefunden haben.

3.5. Bemerkungen zur Schichtfolge

Charakteristische Gesteinsfolgen sind schwer zu eruieren, da Grünschiefer und verschiedene Phyllit-typen sich teilweise kaum voneinander unterscheiden lassen, bzw. kontinuierlich ineinander übergehen können. Eine zusätzliche Schwierigkeit stellen die tektonischen Kleinstrukturen dar. Für die einzelnen Profile ergeben sich aus der tektonischen Analyse folgende Anhaltspunkte:

Im Profil H1 überwiegen im Hangenden Schwarzschiefer, darunter liegen Grünschiefer und Phyllite, im Liegenden Karbonatphyllite. Das Profil H4 zeigt, abgesehen vom Kalkmarmor in obersten Teilen eine ähnliche Abfolge. Im Profil H2 herrschen Grünschiefer und Phyllite vor, die im Hangenden von Schwarzschiefern und Kalkmarmoren abgelöst werden. Die Profile H 5 und H 6 bestehen aus einem Hangend- und Liegendkomplex mit einer intensiven Schwarzschiefer-Grünschiefer-Phyllit-Wechselfolge, dazwischen liegt eine Grünschiefer-Phyllit-Komplex. Profil H 7 ist durch Schwarzschiefer charakterisiert, zu denen im Liegenden Grünschiefer und Phyllite treten. Innerhalb der Profile fällt auf, daß die Schwarzschiefer immer im Hangenden von Grünschiefern und Phylliten liegen.

Die gesamte Abfolge erscheint über die Profile nur lückenhaft belegt, da es nicht gelang, die Schichtfolge der einzelnen Profile miteinander zu korrelieren. Aus den tektonischen Strukturen kann das Liegende im SE, das Hangende im NW des Bohrareals angenommen werden. Die Angabe einer Schichtfolge über den Gesamtbereich ist also nur als Versuch mit einigen Fragezeichen zu werten.

Hangend

Schwarzschiefer-Grünschiefer-Phyllit

Grünschiefer-Phyllit

Schwarzschiefer-Grünschiefer-Phyllit

Schwarzschiefer

teilweise Kalkmarmor

Grünschiefer-Phyllit-Karbonatphyllit

Liegend

4. Schlußfolgerungen

Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, über Zeitreihenanalysen tektonische Strukturen aus Bohrprofilen zu rekonstruieren. Aus der mathematisch-statistischen Bearbeitung wird ein tektonisches Modell erstellt, das im Vergleich mit den Bohrprofilen realistisch scheint, aber nur eine vereinfachte Annäherung an die komplizierten tektonischen Verhältnisse geben kann. Eine Erweiterung des Ansatzes könnte über einen umfangreicheren Einsatz spektralanalytischer Methoden unter Verwendung von Streckungsfaktoren (KWON & RUDMAN 1979) erfolgen, wodurch bessere Vergleiche der verschiedenen großen scheinbaren Mächtigkeiten in Abhängigkeit vom Einfallen möglich sind. Da Zeitreihenanalysen im Bereich der Tektonik bisher keine Verwendung fanden, können die Einsatzmöglichkeiten nur an der vorliegenden Problemstellung diskutiert werden und bedürfen einer weiteren Überprüfung durch ähnliche Untersuchungen.

Literatur:

- AGTERBERG, F.P. 1974: Geomathematics.- 596 S., Amsterdam-London-New York (Elsevier).
- BRANDT, S. 1968: Statistische Methoden der Datenanalyse.- B.I.Hochschulschriften, 816/816a, Mannheim-Wien-Zürich (Bibliographisches Institut).
- DAVIS, J.C. 1973: Statistics and data analysis in geology.- 550 S., New York (Wiley).
- EBNER, F. & WEBER, L. 1978: Die geologisch tektonischen Verhältnisse zwischen Tannebenstock und Rötischgraben (Grazer Paläozoikum).- Mitt.naturwiss.Ver. Stmk., 108, 95-113.
- FLÜGEL, H. 1975: Die Geologie des Grazer Berglandes (2.Aufl.).- Mitt.Abt.Geol.Paläont.Bergb.Landesmus. Joanneum, SH 1, 288 S.
- 1980: Die frühalpiner geologisch-petrographische Entwicklung der östlichen Ostalpen im Meridian Ennstal-Drautal.- Jber.1979, Hochschulschwerpkt. S15, 1, 87-97.

- FLÜGEL, H. 1981: Zur Trennung jungvariszischer und altpaläozoischer Tektonik im Paläozoikum von Graz.- Jber.1980, Hochschulschwerpunkt S15, 2, 105-113.
- JENKINS, G.M. & WATTS, D.G. 1968: Spectral analysis and its applications.- 525 S., San Francisco (Holden-Day).
- KWON, B.D. & RUDMAN, A.J. 1979: Correlation of geologic logs with spectral methods.- J.Int.Ass.Math.Geol., 11, 4, 373-390.
- PARZEN, E. 1964: An approach to empirical time series analysis.- Radio Science J.Res., 680, 9, 937-951.
- SCHWARZACHER, W. 1975: Sedimentation models and quantitative stratigraphy.- 382 S., Amsterdam-Oxford-New York (Elsevier).
- STAT-PACK, Univac Large Scale Systems 1972: Programmer Reference.- 557 S., New York (Rand Corp.).
- STATTEGGER, K. 1982: Application of time series analysis to tectonic reconstructions of disturbed rock sequences recorded from logs with examples from the Paleozoic of Graz, Austria (in Vorb.).
- TUFAR, W. 1972: Zur Blei-Zink Vererzung des Grazer Paläozoikums.- Min.Mittbl.Joanneum, 1972, 2, 64-75.
- WEBER, L. 1977: Die Stellung der stratiformen Blei-Zinkvererzungen im Grazer Paläozoikum, beleuchtet an Hand der Lagerstätten Schrems-Rechberg sowie Kaltenberg-Burgstall (Oststeiermark).- Mitt.Abt. Geol.Paläont.Bergb.Landesmus.Joanneum, 28, 123-141, Graz.
- 1978: Die geologischen und tektonischen Resultate der Strukturbohrungen am Schönberg zum Nachweis der Haufenreither Blei-Zinkerzlager.- Unveröffentl. Ber., Wien.