

C. Geochemie

KTB Oberpfalz VB –
Röntgenanalytik
Spülnungsanalytik
Gasanalytik

A. Stroh
H.-J. Heinschild
K. D. Homann
M. Tapfer

KTB Report	88-6	C1-C109	13 Abb.	Hannover 1988
------------	------	---------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530 m:

C. Geochemie

A. Stroh, H.-J. Heinschild, K.D. Homann, M. Tapfer *

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>		Seite
C.1	Einleitung	C 2
C.2	Probennahme und Probenaufbereitung	C 3
C.3	Röntgenanalytik	C 3
C.3.1	RDA/RFA-Ergebnisse an Bohrmehl und Kernstücken des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 3
C.3.2	Vergleich der Ergebnisse von Bohrmehl und Bohrklein während der Richtbohrphase 992-1228 m	C 15
C.4	Spülungsanalytik	C 23
C.4.1	Funktionsprinzip der ICP - AES	C 23
C.4.1.1	Geräteparameter und verwendete Meßprogramme	C 26
C.4.2	Ergebnisse der Kationen- und Anionenanalyse des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 27
C.4.3	Dekrepitationsanalytik	C 37
C.5	Gasanalytik	C 42
C.5.1	Funktionsprinzip des Prozeßgas-Massenspektrometers	C 43
C.5.2	Ergebnisse des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 44
C.5.3	Festlegung von Störungzonen anhand chemischer Parameter	C 52
C.6	Zusammenfassung	C 54
C.7	Schriftenverzeichnis	C 56
C.8	Danksagung	C 57
C.9	Anhang	C 58

*Anschrift der Autoren:

KTB-Feldlabor, D-8486 Windischeschenbach

C.1 Einleitung

Während der Bohrphase von 478.5 - 992.0 m wurde eine kontinuierliche Neigung des Bohrlochs aufgebaut. Nach der Beendigung der Logging-Phase vom 04.01.88 - 09.01.88 wurde deshalb ab 992 m mit der Einleitung von Richtbohrarbeiten begonnen. Diese Arbeiten werden mit einem 3½" Rotarybohrstrang und mit Rollenmeißeln durchgeführt. Von 992.0 - 1228.8 m konnte deshalb mit Ausnahme des Referenzkerns Nr. 253 (1177.0 - 1183.0 m) nicht gekernt werden. Nach Abschluß der Richtbohrphase wurde ab 1228.8 m bis 1530.0 m die Seilkerntechnik mit Diamantbohrkronen eingesetzt, so daß in diesem Bereich ein nahezu 100%iger Kerngewinn erzielt werden konnte.

In diese Richtbohrphase fällt ein lithologischer Wechsel von Paragneisen zu Amphiboliten (bei 1160.0 m). Dieser Wechsel sowie die weiter unten eingeschalteten Granat-Amphibolite, Hbl-Gneise und Meta-Ultrabasite können anhand der durchgeführten Untersuchungen der Geochemiegruppe eindeutig identifiziert und belegt werden. Die Einteilung der lithologischen Einheiten erfolgte zunächst nur anhand der Informationen, die die kontinuierliche Untersuchung des Zentrifugenmaterials mit der RDA/RFA liefert. Diese Daten werden durch Untersuchungen an Kernstücken der anderen Arbeitsgruppen gestützt. Die charakteristischen Gesteinstypen werden chemisch und mineralogisch beschrieben.

Während der Richtbohrarbeiten von 992.0 - 1228.8 m wurden bedingt durch die Bohrtechnik neben dem Zentrifugenmaterial auch Cuttings erbohrt und beprobt. Somit konnten erstmals die Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse an beiden Probenarten über einen größeren Bereich miteinander verglichen werden.

Im Berichtszeitraum wurde, neben der kontinuierlichen Durchführung der Feststoff- und Spülungsanalytik, erstmals auch eine regelmäßige Bestimmung der in der Bohrspülung gelösten Gase mit einem Prozeßgasmassenspektrometer durchgeführt.

Außerdem wurde an der ICP-AES eine Dekrepatationsanlage aufgebaut, mit der Flüssigkeitseinschlüsse (fluid-inclusions) in Quarzen untersucht werden.

C.2 Probennahme und Probenaufbereitung

Die Probennahme und Probenaufarbeitung der Feststoffe und Spülungsproben entspricht dem im KTB Report 88-1 beschriebenen Verfahren. Während der Richtbohrphase von 992.0 - 1228.8 m wurde der Probenabstand der Zentrifugenproben bei den RDA-Untersuchungen bis auf wenige Ausnahmen von 2m auf 1m verdichtet. Für Korrelationstests zwischen Zentrifugenproben und Cuttings wurden von 995.0 bis 1192.0 m, außer den kontinuierlich durchgeführten Messungen an Z-Proben, zusätzlich Cuttings untersucht. Die Cuttings wurden ebenfalls z.T. im 1m- Abstand gemessen. Dadurch ist ein nahezu lückenloser Vergleich der Ergebnisse beider Probenarten über einen Bereich von ca. 200 m mit mehreren Ereignissen (lithologischer Wechsel, Störungszonen) möglich.

Der für eine luftkontaminationsfreie Bohrspülungsentgasung vorgesehene Entgaser konnte infolge technischer Schwierigkeiten bisher nicht in Betrieb genommen werden. Um überhaupt Gasmessungen durchführen zu können, wurde ab Januar 1988 ein Quirlentgaser der Fa. GEODATA in der Spülungsrinne installiert. Dieser Entgasertyp wird bei konventionellen Explorationsbohrungen eingesetzt.

C.3 Röntgenanalytik

C.3.1 RDA/RFA - Ergebnisse an Bohrmehl und Kernstücken 992.0 - 1530.0 m

Die Einteilung der lithologischen Einheiten und die Bezeichnung der Gesteine erfolgte anhand des quantitativen Mineralbestandes und der chemischen Daten. Damit wurde der Versuch unternommen, im Hinblick auf die z.T. kernlose Hauptbohrung, ein lithologisches Profil aus chemischen (Hauptelemente sowie Rb, Sr, Zr, Cr, Ni, S) und mineralogischen Daten zu erstellen. Störungs- oder Vergrünungszonen sind bei den angegebenen Daten (Mittelwerte und Variationsbereich) nicht berücksichtigt. Der Teufenbereich, in dem die größte Störungszone auftritt, wird als Litho-Einheit abgegrenzt und im Text beschrieben; alle anderen Störungszonen sind in Kap. C.5.3 in Tabellenform zusammengestellt und durch chemisch-mineralogische Daten charakterisiert. Die Auflösung des lithologischen Profils ist durch den Abstand der Probennahme gegeben. Da dieser, außer während der Richtbohrphase, in der

Regel 2 m beträgt, versteht sich die Angabe der jeweiligen Teufenbereiche auf ± 2 m. Bei einem in dieser Art aufgestellten Log können die teilweise im Meterbereich wechselnden unterschiedlichen Amphibolittypen (Kernansprache) nur grob abgegrenzt werden. Die durch Kernansprache oder Dünnschliffe ermittelten lithologischen Grenzen sind im Abschnitt B, Geologie, dieses Berichts genannt. Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse der Zentrifugen - Proben in Form eines Teufenlogs (Maßstab 1 : 1000) ist im Anhang gegeben. Auf Wunsch können detailliertere Logs (1 : 400) zur Verfügung gestellt werden. Die mineralogische und chemische Zusammensetzung charakteristischer Gesteine wird für die jeweiligen Teufenbereiche aufgeführt. Bei kernlosen Bohrphasen werden die an Zentrifugenproben erzielten Ergebnisse angegeben.

Die Teufenbereiche von 992.0 - 996.0 m und 1178.0 - 1180.0 m sind wegen des wiederholten Ein- und Ausbaus des Bohrstranges durch Nachfall aus dem Hangenden kontaminiert. Sie werden daher bei der Diskussion der Daten ausgeklammert.

Der Teufenbereich 992.0 - 1159.0 m besteht aus einer monotonen, leicht alterierten Paragneisserie. Als Hauptmineralphasen treten Quarz, Plagioklas, Hellglimmer, Chlorit und Biotit auf. In Tab. C.3.1 sind der Variationsbereich und die Mittelwerte des Mineralbestandes sowie die chemischen Haupt- und Spurenelementdaten einer repräsentativen Zentrifugen - Mischprobe aufgeführt.

Tab. C.3.1: Mineralogische und chemische Zusammensetzung der Paragneise 992.0 - 1159.0 m

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variationsbereich	Gew.- %
	Z 1159 m	Z 1159 m		Z - Proben	X
SiO ₂	61.7	Cr 97	Quarz	30 - 45	35
TiO ₂	0.95	Ni 56	Plagioklas	15 - 35	25
Al ₂ O ₃	16.5	Cu 45	Biotit	0 - 7	5
Fe ₂ O ₃ r	7.00	Zn 157	Muskovit	10 - 30	20
MnO	0.20	Nb 12	Chlorit	5 - 20	15
MgO	2.92	Pb 22			
CaO	1.60	Rb 88			
Na ₂ O	2.75	Sr 152			
K ₂ O	2.72	Y 36			
P ₂ O ₅	0.13	Zr 228			

In den Paragneisen tritt zwischen 1024.0 - 1040.0 m eine Störungszone auf, die weniger durch erhöhte Chloritgehalte als durch eine deutliche Pyritführung (und Schwefelgehalte bis nahe 2 Gew.-%) gekennzeichnet ist.

Ab 1160.0 m werden die bis dahin anstehenden Paragneise von biotit- und granatführenden Amphiboliten abgelöst. Hauptge-

mengteile dieser Gesteine sind Plagioklas und Amphibol, Nebengengteile sind Granat, Quarz und Chlorit, wobei der gemessene Quarz- Anteil überwiegend in Mobilisaten vorkommen dürfte. Lokal wurden hohe Prehnit- Gehalte ($\approx 15\%$ im oberen Teufenbereich) und untergeordnet Klinopyroxen und Biotit festgestellt. Als Akzessorien konnten stellenweise Ilmenit, Apatit, (Turmalin) und Titanit bestimmt werden. Der Variationsbereich der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung einer für dieses Gestein typischen Probe ist in Tab. C. 3. 2. aufgeführt.

Im Teufenbereich von 1229.0 - 1253.0 m steht ein vererzter biotit- und granatführender Hornblende- Gneis an. Der mittlere Quarz- Anteil dieses Gneises beträgt $\approx 20\%$. Die Amphibolgehalte liegen bis auf wenige Ausnahmen deutlich unter 25%. Granat konnte nur im Teufenbereich 1241 - 1243 m nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Amphiboliten sind die Gehalte an SiO_2 und Zr höher, die an Fe, Ca, Cr und Ni niedriger.

Tab. C.3.2: Mineralogische und chemische Zusammensetzung der biotit- und granatführenden Amphibolite 1160-1228 m.

Gew.-%		ppm		Mineral	Variations- bereich Z - Proben	Gew.- % X
Z 1210 m	Z 1210 m	Z 1210 m	Z 1210 m			
SiO_2	50.2	Cr	239	Quarz	0 - 15	7
TiO_2	1.58	Ni	119	Plagioklas	25 - 54	40
Al_2O_3	16.9	Cu	61	Biotit	0 - 4	2
Fe_2O_3	9.72	Zn	142	Muskovit	0 - 8	4
MnO	0.15	Nb	15	Amphibol	20 - 50	35
MgO	6.33	Ba	363	Chlorit	2 - 15	5
CaO	8.08	Pb	12	Granat	0 - 13	6
Na_2O	3.39	Rb	30	Klinopyroxen	0 - 7	1
K_2O	1.13	Sr	302			
P_2O_5	0.24	Y	42			
		Zr	206			

Auffallend sind sehr hohe Schwefelgehalte 0.2% bis 1.5 Gew.-%). Als Haupterzmineral tritt Pyrit mit bis zu 4 Gew.% (RDA) auf. Die chemischen und mineralogischen Daten aus diesem Bereich (1229 -1253 m) sind in Tab. C. 3. 3. zusammengestellt.

Tab. C.3.3 Chemische und mineralogische Zusammensetzung des vererzten biotit- und granatführenden Hornblende - Gneises 1229 - 1253 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variations- bereich Z - Proben	Gew.-%
	262A2 (1271.7 m)	262A2			262A2
SiO ₂	61.5	Cr	29	Quarz	10 - 30
TiO ₂	0.71	Ni	12	Plagioklas	20 - 62
Al ₂ O ₃	17.4	Cu	5	Biotit	0 - 3
Fe ₂ O ₃ r	5.50	Zn	81	Muskovit	0 - 20
MnO	0.10	Nb	6	Amphibol	5 - 35
MgO	2.05	Ba	-	Chlorit	5 - 25
CaO	5.41	Pb	5	Granat	0 - 10
Na ₂ O	5.13	Rb	15	Pyrit	0 - 4
K ₂ O	0.64	Sr	357		
P ₂ O ₅	0.27	Y	22		
		Zr	247		

Der Teufenbereich von 1254 - 1439 m wird von einem Granat-Amphibolit mit Quarz-Feldspat-Mobilisaten dominiert, in den ein granatarmer bis granatfreier Amphibolit sowie vier Meta-Ultrabasite und ein Metabasit mit unterschiedlichen Mächtigkeiten eingeschaltet sind.

Eine exakte Festlegung der lithologischen Grenzen dieser Linsen ist durch die Mischnatur der Zentrifugenproben und den Untersuchungsabstand von 1-2 m nicht möglich. Hier wird auf den Bericht der Geologiegruppe in Kap.B verwiesen.

Granatamphibolit tritt in den Teufenbereichen von 1254 - 1296 m, 1337 - 1380 m, 1386 - 1409 m und 1417 - 1439 m auf. Dabei zeigen die Mineralgehalte von Amphibol (12 - 54%), Plagioklas (23 - 62%) und Granat (5 - 28 %) starke Variationen. In einzelnen Bereichen sind diese Gesteine klinopyroxen- und titanitführend. Der gemessene Quarzgehalt (RDA) ist laut Kernansprache überwiegend an Mobilisate gebunden. Hellglimmer tritt vermutlich als Alterationsprodukt von Plagioklas auf. Der SiO₂ - Gehalt reicht von 46 bis 50 Gew.%. Die MgO- und CaO- Gehalte liegen zwischen ≈5 und 10 Gew.%. Der K₂O- Gehalt schwankt zwischen von 0.4 und 0.7 Gew.%, in glimmerführenden Partien kann er auch 1 Gew.% überschreiten.

Die Variationsbreite des quantitativen Mineralbestandes sowie chemische und mineralogische Einzelergebnisse an ausgesuchten Kernstücken sind für diese vier Teufenbereiche in den nachfolgenden Tab. C. 3. 4. - C. 3. 7. zusammengestellt. Aufgrund der sehr inhomogenen Zusammensetzung dieser Gesteinsserie, geben die Daten nur einen ersten Anhaltspunkt für die stoffliche Vielfalt der einzelnen Gesteinstypen.

Tab. C.3.4: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat - Amphibolits mit Mobilisaten im Teufenbereich 1254 - 1296 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %		
	263A6a	267G1u	263A6a	267G1u		263A6a	267G1u	
	(1257.9 m)	(1285.7m)						
SiO ₂	47.6	46.9	Cr	225	267	Quarz	-	-
TiO ₂	1.47	1.13	Ni	57	29	Plagioklas	33	41
Al ₂ O ₃	16.9	17.6	Cu	24	20	Biotit	-	-
Fe ₂ O ₃ T	9.98	9.45	Zn	76	67	Muskovit	-	-
MnO	0.17	0.15	Nb	6	6	Amphibol	49	34
MgO	8.20	9.12	Ba	-	-	Chlorit	8	5
CaO	9.53	9.85	Pb	5	5	Granat	10	13
Na ₂ O	3.01	2.62	Rb	11	11	Pyrit	-	-
K ₂ O	0.43	0.55	Sr	307	316	Klinopyroxen	-	7
P ₂ O ₅	0.16	0.13	Y	27	22			
			Zr	106	88			

Tab. C.3.5: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat - Amphibolits mit Mobilisaten im Teufenbereich 1337 - 1380 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %	
	281A1a	281A1a	281A1a	281A1a		281A1a	281A1a
	1339.0 m	1339.0 m	1339.0 m	1339.0 m		1339.0 m	1339.0 m
SiO ₂	52.7	Cr	215	Quarz	-		
TiO ₂	0.96	Ni	27	Plagioklas	45		
Al ₂ O ₃	16.7	Cu	14	Biotit	-		
Fe ₂ O ₃ T	8.09	Zn	81	Muskovit	3		
MnO	0.12	Nb	6	Amphibol	41		
MgO	6.59	Ba	-	Chlorit	5		
CaO	7.94	Pb	-	Granat	6		
Na ₂ O	4.51	Rb	13	Pyrit	-		
K ₂ O	0.79	Sr	257	Klinopyroxen	-		
P ₂ O ₅	0.08	Y	20	Ilmenit	-		
		Zr	109				

Tab. C.3.5: Fortsetzung

Gew.-%		ppm	Mineral	Gew.- %	
287E2KT 1377.5 m		287E2KT 1377.5 m		287E2KT 1377.5 m	
SiO ₂	47.6	Cr	208	Quarz	-
TiO ₂	0.98	Ni	159	Plagioklas	47
Al ₂ O ₃	19.2	Cu	33	Biotit	-
Fe ₂ O ₃ T	8.75	Zn	65	Muskovit	-
MnO	0.12	Nb	7	Amphibol	42
MgO	9.01	Ba	-	Chlorit	4
CaO	9.54	Pb	-	Granat	7
Na ₂ O	2.92	Rb	14	Pyrit	-
K ₂ O	0.57	Sr	349	Klinopyroxen	-
P ₂ O ₅	0.17	Y	19	Titanit	-
		Zr	96		

Tab. C.3.6: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat- Amphibolits im Teufenbereich 1386 - 1409 m.

Gew.-%		ppm	Mineral	Gew.- %	
293A1c 1405.18 m		293A1c 1405.18 m		293A1c 1405.18 m	
SiO ₂	50.7	Cr	218	Quarz	3
TiO ₂	1.6	Ni	102	Plagioklas	28
Al ₂ O ₃	16.3	Cu	37	Biotit	-
Fe ₂ O ₃ T	10.3	Zn	79	Muskovit	-
MnO	0.15	Nb	6	Amphibol	52
MgO	7.61	Ba	-	Chlorit	3
CaO	7.83	Pb	-	Granat	14
Na ₂ O	3.01	Rb	13	Pyrit	-
K ₂ O	0.66	Sr	102	Klinopyroxen	Sp
P ₂ O ₅	0.19	Y	25	Titanit	-
		Zr	102		

Tab. C.3.7: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat- Amphibolites im Teufenbereich 1417 - 1439 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Gew.- %
	295H1s (1421.5 m)	295H1s		295H1s
SiO ₂	50.9	Cr 146	Quarz	15
TiO ₂	2.10	Ni 33	Plagioklas	41
Al ₂ O ₃	16.8	Cu 44	Biotit	Sp
Fe ₂ O _{3 T}	13.00	Zn 91	Muskovit	-
MnO	0.30	Nb 16	Amphibol	19
MgO	4.46	Ba -	Chlorit	12
CaO	5.83	Pb 5	Granat	12
Na ₂ O	2.84	Rb 20	Pyrit	-
K ₂ O	0.83	Sr 263	Klinopyroxen	Sp
P ₂ O ₅	0.33	Y 35	Titanit	-
		Zr 209		

Der Granat- Amphibolit im Teufenbereich 1297 - 1306 m unterscheidet sich von den zuvor beschriebenen Amphiboliten durch seinen geringeren SiO₂- Gehalt. Auffallend sind in diesem Bereich höhere Cr - und Ni - Werte bei gleichzeitiger Verarmung an Rb und Zr. Stellenweise wurde bis zu 3 Gew.-% Ilmenit nachgewiesen. Die Daten dieser Gesteine sind in Tab. C. 3. 8. zusammengestellt.

Tab. C.3.8: Chemische und mineralogische Zusammenstellung der Granat-Amphibolite 1297 - 1306 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variations- bereich	Gew.- %
	271B1b 1297.2 m	271B1b 1297.2 m		in Z - Proben	271B1b 1297.2 m
SiO ₂	47.0	Cr 270	Quarz	0 - 11	-
TiO ₂	1.14	Ni 105	Plagioklas	25 - 35	36
Al ₂ O ₃	18.0	Cu -	Biotit	-	-
Fe ₂ O _{3 T}	9.60	Zn 78	Muskovit	nur in Störungen	
MnO	0.15	Nb -	Amphibol	45 - 65	41
MgO	9.16	Ba -	Chlorit	4 - 10	4
CaO	9.81	Pb -	Granat	0 - 15	15
Na ₂ O	2.52	Rb 13	Pyrit	0 - 2	-
K ₂ O	0.49	Sr 333	Klinopyroxen	-	-
P ₂ O ₅	0.12	Y 25	Ilmenit	0 - 3	4
		Zr 95			

In die Granat-Amphibolite ist zwischen 1307 und 1326 m ein granatfreier oder -armer Amphibolit eingeschaltet. Hauptminerale sind Plagioklas und Amphibol sowie untergeordnet Chlorit, Klinopyroxen, Biotit und in Mobilisaten Quarz. Die chemischen und mineralogischen Analysendaten eines Kernstückes sowie der Variationsbereich der mineralogischen Zusammensetzung der Z - Proben sind in Tab. C. 3. 9. zusammengestellt.

Tab. C.3.9: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Amphibolite 1307 - 1326 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variations- bereich	Gew.- %	
	278F1g	278F1g		in Z - Proben	278F1g	
	1324.07 m	1324.07 m			1324.07 m	
SiO ₂	47.4	Cr	315	Quarz	5 - 25	-
TiO ₂	1.80	Ni	155	Plagioklas	30 - 50	26
Al ₂ O ₃	15.4	Cu	40	Biotit	-	-
Fe ₂ O ₃ T	12.1	Zn	91	Muskovit	-	-
MnO	0.19	Nb	<5	Amphibol	10 - 45	66
MgO	8.92	Ba	-	Chlorit	5 - 15	8
CaO	9.16	Pb	-	Granat	-	-
Na ₂ O	2.93	Rb	10	Pyrit	-	-
K ₂ O	0.47	Sr	182	Klinopyroxen	0 - 5	-
P ₂ O ₅	0.16	Y	36			
		Zr	123			

Als weitere wichtige Gesteinstypen treten verschiedene "Meta-Ultrabasite" auf. Sie sind in den Teufenbereichen 1327 - 1337 m, 1381 - 1385 m, 1400 m und 1410 - 1416 m in die zuvor beschriebenen Amphibolite und Granat-Amphibolite eingelagert. Charakteristisch für diese Gesteine ist eine starke Anreicherung an MgO, Fe₂O₃ T, Cr und Ni sowie eine Verarmung an SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, Rb, Sr und Zr.

Mineralogisch sind diese Gesteine überwiegend aus zwei Amphibolarten (Anthophyllit und Hornblende) und Chlorit zusammengesetzt. In zwei Proben konnte das Mineral Talk mit Gehalten von 14 - 27 Gew.% bestimmt werden. Zwei dieser Ultrabasite sind plagioklasfrei; als "Akzessorien" treten Calcit, Klinopyroxen und möglicherweise in sehr geringen Mengen Magnesit auf. Im Gesteinsdünnschliff 288C1qT wurde weiterhin das Mineral Serpentin identifiziert (BLÜMEL, pers. Mitt.). Durch die röntgenographische Untersuchung des gleichen Kernstückes konnte diese Aussage jedoch nicht bestätigt werden. Die gemessenen Quarz-Gehalte stammen wahrscheinlich aus dem Nebengestein. Das erklärt auch bei einigen Proben den für Ultrabasite etwas zu hohen SiO₂-Gehalt von 45.7 - 46.8 Gew.%. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung einiger ausgewählter Kernstücke und Mischproben (Z-Proben) sind in Tab. C. 3. 10.- 12. dargestellt.

Tab. C.3.10: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Meta - Ultrabasite 1327 - 1337 m.

	Gew.-%		ppm	Mineral	Variations- bereich in Z - Proben	Gew.- %
	279F1h 1330.08 m	279F1h 1330.08 m				
SiO ₂	45.7		Cr 538	Quarz	0 - 5	-
TiO ₂	1.48		Ni 345	Plagioklas	15 - 20	19
Al ₂ O ₃	14.3		Cu 163	Amphibol	55 - 75	55
Fe ₂ O ₃ r	12.1		Zn 89	Klinopyroxen	0 - 5	-
MnO	0.16		Nb <5	Chlorit	5 - 15	26
MgO	13.3		Ba -	Talk	-	Sp
CaO	7.41		Pb -			
Na ₂ O	2.33		Rb <5			
K ₂ O	0.25		Sr 179			
P ₂ O ₅	0.14		Y 29			
			Zr 119			

Tab. C.3.11: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Meta - Ultrabasite 1381 - 1385 m.

	Gew.-%		ppm	Mineral	Gew.- %		
	288F4 1382.6m	288C1qT 1380.71m				Z1383 m 1380.71m	288C1qT 1380.71m
SiO ₂	42.35	43.8	Cr 575	655	Amphibol	40	45
TiO ₂	0.92	1.04	Ni 358	618	Chlorit	29	21
Al ₂ O ₃	8.89	10.2	Cu 57	-	Talk	27	16
Fe ₂ O ₃ r	14.07	13.5	Zn 196	102	Anthophyllit	-	18
MnO	0.18	0.18	Nb 9	-			
MgO	21.98	19.7	Ba -	-			
CaO	5.14	6.39	Pb 9	-			
Na ₂ O	0.92	1.2	Rb <5	<5			
K ₂ O	0.24	0.19	Sr 178	105			
P ₂ O ₅	0.18	0.19	Y 25	22			
			Zr 119	105			

Tab. C.3.12: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Meta - Ultrabasite bei 1400m und 1410 - 1416 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %		
	291G1n	293H2r	291G1n	293H2r		291G1n	293H2r	
	1400.72m	1410.1m	1400.72m	1410.1m		1400.72m	1410.1m	
SiO ₂	41.5	46.8	Cr	692	579	Amphibol	54	78
TiO ₂	0.99	0.78	Ni	362	406	Chlorit	46	22
Al ₂ O ₃	11.3	8.10	Cu	8	12	Talk	-	Sp
Fe ₂ O ₃ r	13.7	14.7	Zn	237	114	Titanit	-	Sp
MnO	0.19	0.24	Nb	7	<5			
MgO	19.1	18.7	Ba	-	-			
CaO	7.84	7.46	Pb	-	-			
Na ₂ O	0.44	0.71	Rb	<5	<5			
K ₂ O	0.11	0.12	Sr	28	40			
P ₂ O ₅	0.19	0.12	Y	20	21			
			Zr	107	75			

Im Teufenbereich 1440 - 1441,6 m durchschlägt ein steilstehender pegmatoider Quarz-Feldspat-Gang (Kernansprache) die Amphibolite. Da beim Bohren außer dem Gang stets auch Nebengestein erfaßt wurde, steigt der Quarz-Gehalt in den Z-Mischproben der Teufe 1440-1443 m lediglich auf 48 Gew.%.

Von 1445 bis 1475 m wurde eine Wechselfolge von Amphiboliten (teilweise granatführend) mit "ultrabasischen" Einschuppungen erbohrt. In dem Amphibolit treten als Hauptgemengteile Amphibol und Plagioklas sowie untergeordnet Chlorit und stellenweise Granat auf. In dem "ultrabasischen" Gestein sind ebenfalls Amphibol und Plagioklas die Hauptmineralphasen, jedoch treten deutlich weniger Plagioklas, dafür mehr Amphibol und zusätzlich Klinopyroxen und Ilmenit als neue Phasen auf. Chemisch zeigen die "ultrabasischen" Gesteine eine Anreicherung von Cr, Ni und Mg, und eine Verarmung an SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Rb und Zr. Für die Beprobung eines Kernstücks (KM 301B1b) wurde ein Minikern (Durchmesser 2 cm) gebohrt. Dabei zeigte sich, daß diese Ultrabasite als z.T. nur cm - große Linsen in den Amphibolit eingeschuppt sind. Der Minikern enthielt eine solche Linse, die herauspräpariert und gesondert untersucht wurde. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung dieser beiden Proben und eines charakteristischen Amphibolittyps dieser Abfolge ist in Tab. C. 3. 13. zusammengestellt.

Tab. C.3.13: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Amphibolits und der eingeschalteten "Ultrabasite" 1444 - 1475 m. Für das Kernstück 301B1b sind zwei Analysen aufgeführt, wobei die eingeschleppte ultrabasische Linse mit UB gekennzeichnet ist.

	Gew.-%			ppm			Mineral			Gew.- %		
	306A2b	301B1b		306A2b	301B1b		306A2b	301B1b		301B1b		
	1464.8m	1451.91m		1464.8m	1451.91m		1464.8m	1451.91m		1451.91m		
	UB				UB				UB			
SiO ₂	48.20	45.8	43.7	Cr	202	586	870	Qrz	Sp	-	-	
TiO ₂	1.66	1.50	1.18	Ni	64	334	496	Plg	46	21	-	
Al ₂ O ₃	16.30	16.20	12.80	Cu	31	119	141	Amph	50	63	76	
Fe ₂ O ₃ r	10.80	9.48	11.7	Zn	<5	62	76	Chl	4	16	24	
MnO	0.17	0.13	0.16	Nb	10	8	7	Talk	-	-	Sp	
MgO	7.04	12.4	17.0	Ba	-	-	-					
CaO	8.73	8.23	8.57	Pb	<5	-	-					
Na ₂ O	3.22	2.66	1.33	Rb	15	17	5					
K ₂ O	0.87	0.67	0.80	Sr	286	387	86					
P ₂ O ₅	0.22	0.20	0.14	Y	30	26	23					
				Zr	166	145	113					

In dem gleichen Teufenbereich wurde erstmals ein Serpentin (1449.29 m KM 300G1j) identifiziert. Dieses Gestein konnte nicht anhand der Z-Proben identifiziert werden. Das Zentrifugenmaterial aus diesem Bereich (1450-1454 m) zeigt den für Serpentine charakteristischen Stoffbestand nicht so deutlich wie die untersuchte Kernprobe. An der Kernprobe wurden die seit Bohrbeginn höchsten Gehalte an MgO (24.0 Gew.-%), Cr (1300 ppm) und Ni (700 ppm) sowie die niedrigsten Werte an Al₂O₃ (7.3 Gew.-%), K₂O (0.10 Gew.-%) und Rb (< 3 ppm) bestimmt. In Tabelle C. 3. 14 sind die am Kernstück bestimmten Gehalte zusammengestellt.

Tab. C.3.14: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Serpentinits 1449.29 m (KM 300 G1j).

	Gew.-%	Mineral	Gew.-%
	300G1j 1449.29 m		300G1j 1449.29 m
SiO ₂	41.6	Quarz	-
TiO ₂	0.98	Plagioklas	-
Al ₂ O ₃	7.3	Biotit	-
Fe ₂ O ₃ T	15.2	Anthophyllit	11
MnO	0.20	Hornblende	28
MgO	24.0	Serpentin	43
CaO	4.06	Talk	Sp
Na ₂ O	0.50	Klinopyroxen	Sp
K ₂ O	0.10		
P ₂ O ₅	0.17		

Die unterste Gesteinsserie bilden vererzte biotit- und granatführende Hornblende-Gneise im Teufenbereich 1476 - 1530 m. In diese Gesteine sind immer wieder Amphibolite eingeschaltet. Da diese Einheit anhand der chemischen und mineralogischen Daten im einzelnen nicht aufgelöst werden kann, werden hier zwei typische Beispiele für ein "mehr - gneisiges" und für ein amphibolitisches Gestein vorgestellt. Der Amphibolit besteht aus Plagioklas (30 Gew.%) und Amphibol (60 Gew.%) mit Chlorit und akzessorischem Ilmenit. Der Hornblende-Gneis hingegen hat deutliche Quarz-Gehalte von 10 - 30 Gew.%, und ist biotit- und granatführend. Der Anteil an Amphibol geht in den Hornblende-Gneisen stark zurück. Die Gehalte schwanken zwischen 5 und 25 Gew.%. Chemisch lassen sich die Hornblende-Gneise durch einen Anstieg von SiO₂ und K₂O bei gleichzeitiger Abnahme von MgO, CaO und Fe₂O₃ T von den Amphiboliten unterscheiden. Auffallend sind die durchweg hohen Schwefel-Gehalte in diesen Gesteinen mit Maxima von 1 bis 2 Gew.%. Röntgenographisch wurden Pyrit-Gehalte bis zu 4 Gew.% gemessen. Die an den unterschiedlichen Gesteinstypen gemessenen Daten sind in Tab. C. 3. 15. aufgeführt.

Tab. C.3.15: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der vererzten Abfolge von biotit- und granatführenden Hornblende - Gneise sowie Amphiboliten 1476 - 1530 m (Spurenelementdaten stehen für diese Proben nicht zur Verfügung).

	Gew.-%		Mineral	Gew.-%		
	316B1b 1514.7m	Z - Probe 1504 m		316B1b 1514.7m	Z 1504m	Z 1498m
SiO ₂	47.87	55.6	Quarz	-	28	16
TiO ₂	1.59	1.19	Plagioklas	32	26	36
Al ₂ O ₃	16.66	16.5	Biotit	-	<1	-
Fe ₂ O ₃ T	10.63	10.2	Hellglimmer	-	21	10
MnO	0.18	0.10	Amphibol	62	7	24
MgO	7.81	3.15	Chlorit	4	15	5
CaO	9.69	3.02	Granat	-	-	9
Na ₂ O	2.97	2.70	Klinopyroxen	-	-	Sp
K ₂ O	0.74	2.42	Pyrit	-	3	-
P ₂ O ₅	0.20	0.19	Ilmenit	2	-	-

C.3.2 Vergleich der Ergebnisse von Bohrmehl und Bohrklein im Teufenbereich 992 - 1192 m

Im KTB-Report 88-2 wurde bereits aufgezeigt, daß der an Bohrklein bestimmte Mineralbestand eine gute Korrelation mit dem untersuchten Kernmaterial gleicher Teufe aufweist. Im Verlauf der Richtbohrarbeiten (992 - 1228 m) waren über eine große Strecke zwei unterschiedliche Feststoffproben, nämlich Cuttings sowie Bohrmehl aus der Zentrifuge verfügbar. Durch vergleichende Untersuchungen an beiden Probenarten sollte geklärt werden, welches Material für eine kontinuierliche quantitative Aufnahme des stofflichen Bestandes der durchteuften Formationen am besten geeignet ist. Im einzelnen ergeben sich dabei folgende Fragen :

- a) Können lithologische Wechsel oder Störungs- bzw. Vergrünungszonen durch beide Probenarten belegt werden.
- b) Erfolgt eine Mineralfraktionierung des "Feststoffs" während des Aufstiegs im Bohrloch.
- c) Bei welcher Probenart ist die durch Nachfall oder Bohrlochausbrüche zu erwartende Kontamination aus anderen Bereichen am geringsten.

In den nachfolgenden Abb. C. 3. 1 (Teil 1 -4) sind die an beiden Probenarten gemessenen charakteristischen Mineralphasen des Teufenbereichs 995 - 1192 m dargestellt.

Zu a):

Prinzipiell können alle auftretenden lithologischen Veränderungen durch beide Probenarten erfaßt werden. Im einzelnen sind das:

1) vererzte Störungszone mit Pyritgehalten > 1 Gew. % von 1026 - 1040 m (Abb. C. 3. 1. Teil 1).

2) Höhere Bt-Gehalte in den Paragneisen im Teufenbereich 1072 - 1086 m bzw. geringere Alteration der Gesteine angezeigt durch abnehmende Chlorit-Gehalte (Abb. C. 3. 1 Teil 2).

3) Ab 1130 m wird eine deutliche Zunahme der Alteration festgestellt, hier veranschaulicht durch den Anstieg der Chlorit-Gehalte (Abb. C. 3. 1 Teil 3).

4) Der lithologische Wechsel von Paragneisen zu Amphiboliten mit zwei neu auftretenden Mineralphasen (Amphibol und Prehnit) bei einer Teufe von 1160 m wird deutlich aufgezeigt (Abb. 3.1 Teil 4). Die Plagioklas-Gehalte steigen hier signifikant an, der Quarz-Anteil nimmt drastisch ab.

Zu b):

Eine Fraktionierung beim Austrag der "Feststoffe" durch die Spülung ist bisher in keiner Probenart nachweisbar. Mit zunehmender Vertiefung der Bohrung wären solche Prozesse denkbar. Dabei wird möglicherweise das Cuttingmaterial mit der deutlich größeren Korngröße ($>>160 \mu\text{m}$) stärker betroffen sein, als das Bohrmehl mit einer relativ einheitlichen Korngröße von $< 100 \mu\text{m}$.

Zu c):

Die gemessenen Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung in den Teufenbereichen 1016 - 1021 m und 1177 - 1184 m beruhen auf Nachfall. Die erste Nachfallzone wird im Cuttingsmaterial wesentlich deutlicher aufgezeigt, während die zweite Zone beide Probenmaterialien gleich stark kontaminiert.

Ein Vergleich des Quarzgehaltes in Cuttings und Bohrmehl zeigt ab 1166 m deutliche Unterschiede, die im folgenden diskutiert werden. Beim Bohren mit Rollenmeißeln muß die Bohrspülung mit einer höheren Pumprate zirkuliert werden. Die eingesetzte Zentrifuge ist nicht für solch große Spülmengen ausgelegt, so daß nur ein Teil des Spülungsstromes von der Zentrifuge durchgesetzt werden kann. Ein großer Teil der Spülung wird also mit einer Feststoffbelastung des zuvor erbohrten Gesteins wieder in das Bohrloch eingebracht, während die Cuttings über das Schüttelsieb abgetrennt werden. Dadurch wird ein "Nachschleppen" des Quarzes im Bohrmehl des Teufenbereiches 1166 - 1176 m hervorgerufen.

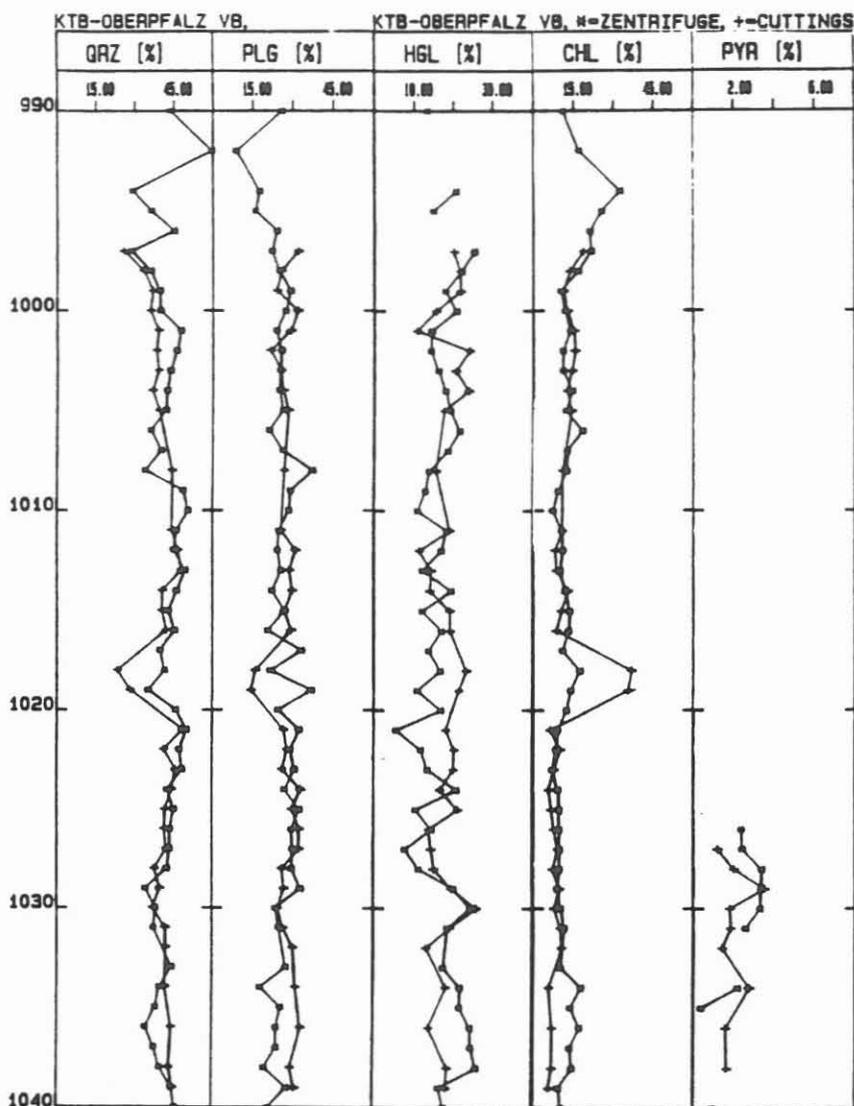


Abb. C. 3. 1: Quantitativer Mineralbestand der untersuchten "Feststoffe" (Cuttings = +, Zentrifugenproben = *) im Teufenbereich 995 - 1192 m. Dargestellt sind die im jeweiligen Teufenbereich gesteinsbildend wichtigen Minerale.

Teil 1: Teufenbereich 990 -1040 m.

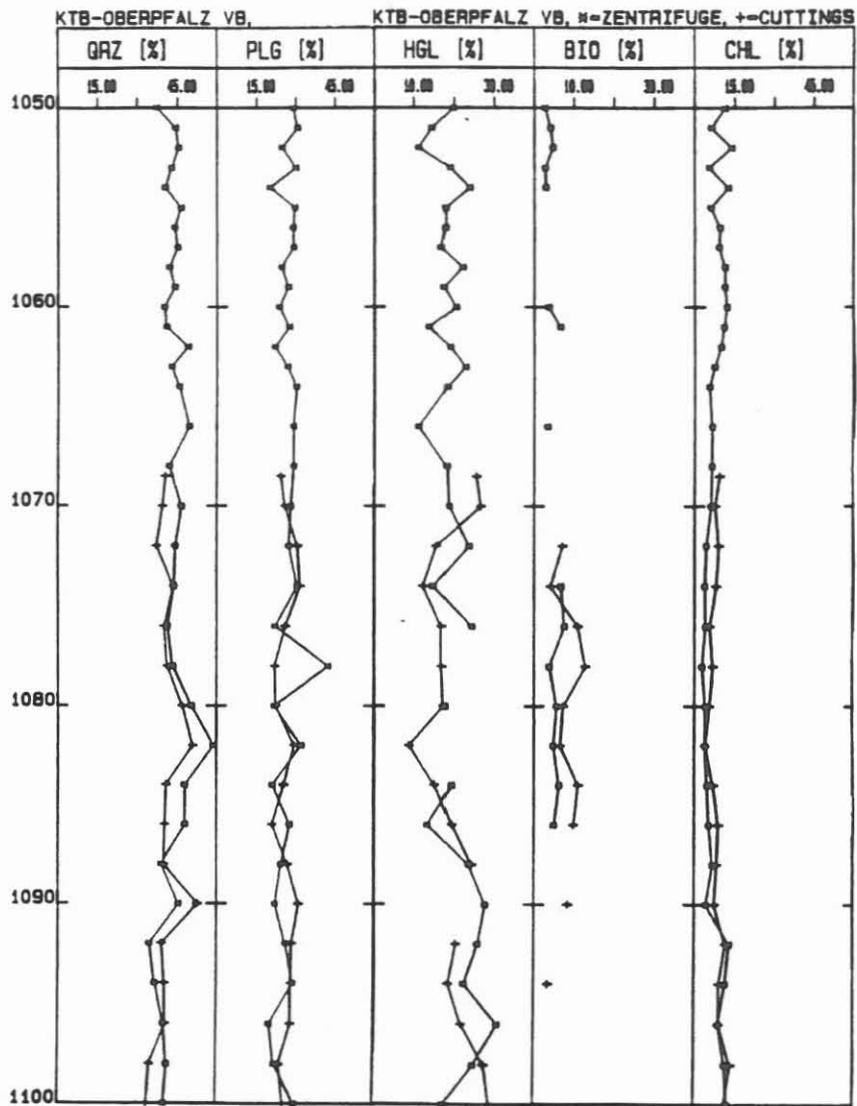


Abb. C.3.1: Fortsetzung

Teil 2: Teufenbereich 1050 - 1100 m.

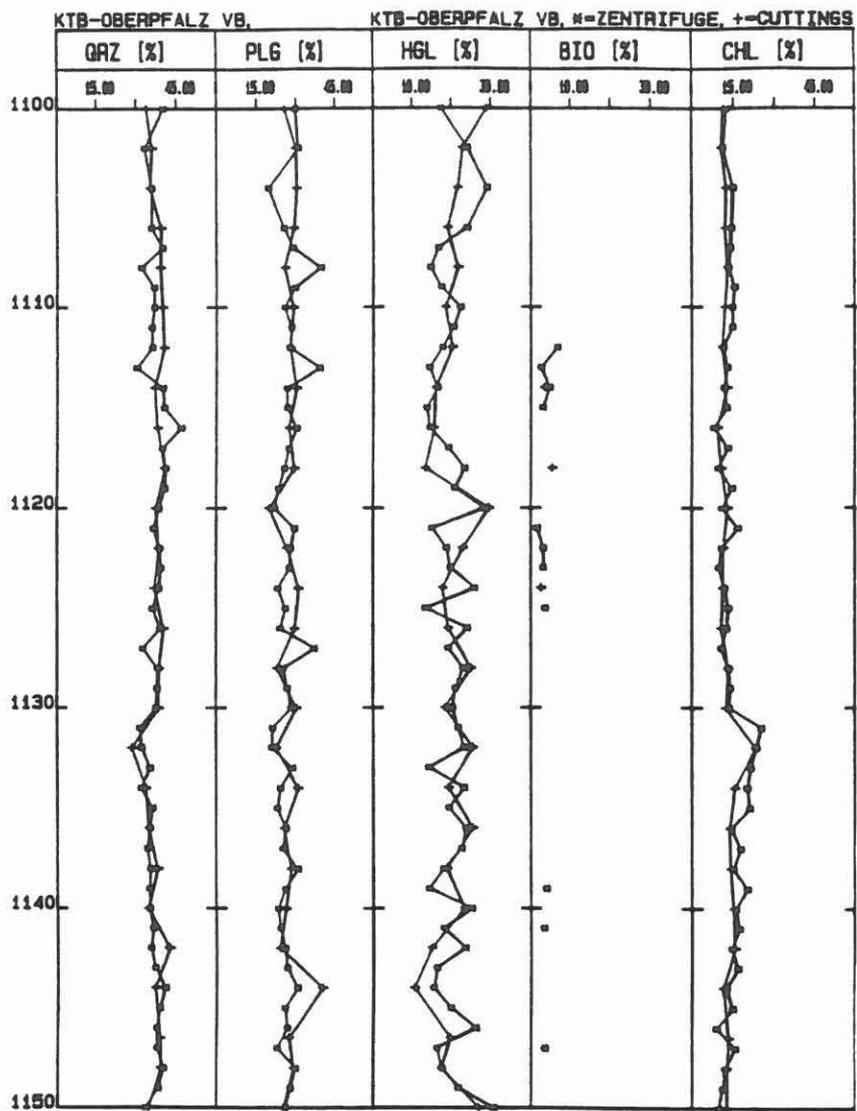


Abb. C.3.1: Fortsetzung

Teil 3: Teufenbereich 1100 -1150 m.

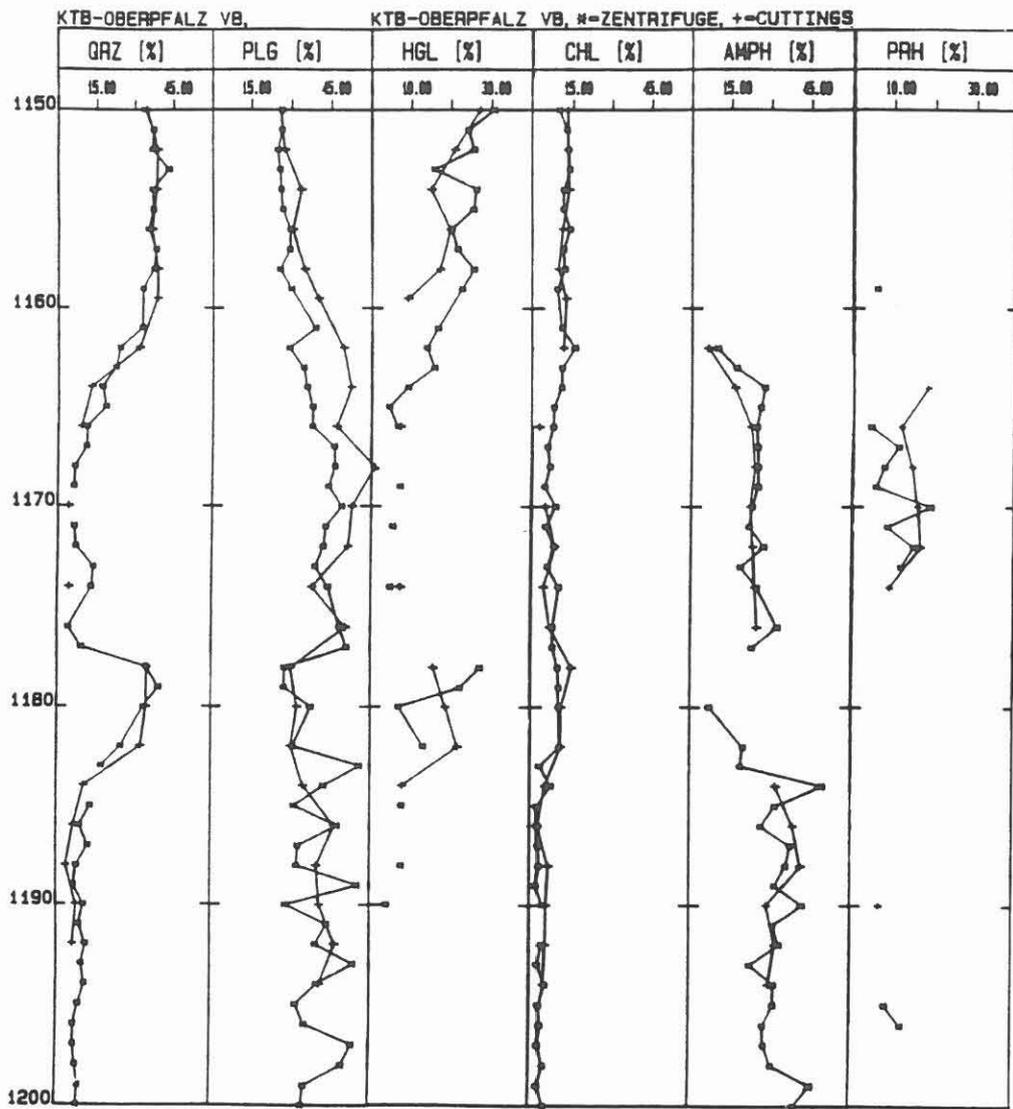


Abb. C.3.1: Fortsetzung

Teil 4: Teufenbereich 1150 - 1200m.

Weiterhin auffällig sind die teilweise stark schwankenden Gehalte einzelner Mineralphasen (Plagioklas und Hellglimmer). Dagegen sind die darstellenden Kurven von z. B. Chlorit nahezu deckungsgleich. Eine endgültige Erklärung hierfür kann zur Zeit noch nicht gegeben werden. Möglich wäre eine starke Variation der Mineralparagenesen, Gesteinsinhomogenitäten oder eine ungenaue Probennahme. Definiert man den Chloritgehalt als Maß für den Alterationsgrad der Gesteine, so sollte das Mineral Chlorit bei gleichbleibender Alteration der Gesteine keine so starken Schwankungen der absoluten Gehalte aufzeigen.

Bleibt die Frage, welche Probenart für eine routinemäßige Aufnahme des quantitativen Mineralbestandes untersucht werden soll. Bei der Anwendung der Seilkerntechnik mit Diamantbohrwerkzeugen fällt überwiegend Bohrmehl an. Eine Korrelation mit den ausgetragenen Cuttings ist bei diesem Bohrverfahren nur ganz schlecht möglich, da diese durch Nachfall aus Störungszonen erheblich kontaminiert sind (Abb. C. 3. 2). Beim Bohren mit Rollenmeißeln fallen beide Probenarten an, die auch gut miteinander korrelieren. Eine Bearbeitung der Zentrifugenproben ist bei wechselnder Lithologie allerdings nur sinnvoll, wenn die technische Auslegung der Zentrifuge derart gewählt wird, daß die gesamte zirkulierende Spülmengemenge durchgesetzt wird und vom Bohrmehl gereinigt werden kann. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu der beschriebenen Verschleppung von Mineralphasen. Bei geeigneter Auslegung der Zentrifuge haben diese Proben den Vorteil gegenüber Cuttings, daß sie vermutlich weniger stark durch Bohrlochausbrüche kontaminiert werden. Im Hinblick auf größere Teufenbereiche werden Bohrmehlproben durch evtl. auftretende Fraktionierungsprozesse während des Ausbringens der "Feststoffe" durch die Spülung vermutlich weniger stark beeinflusst.

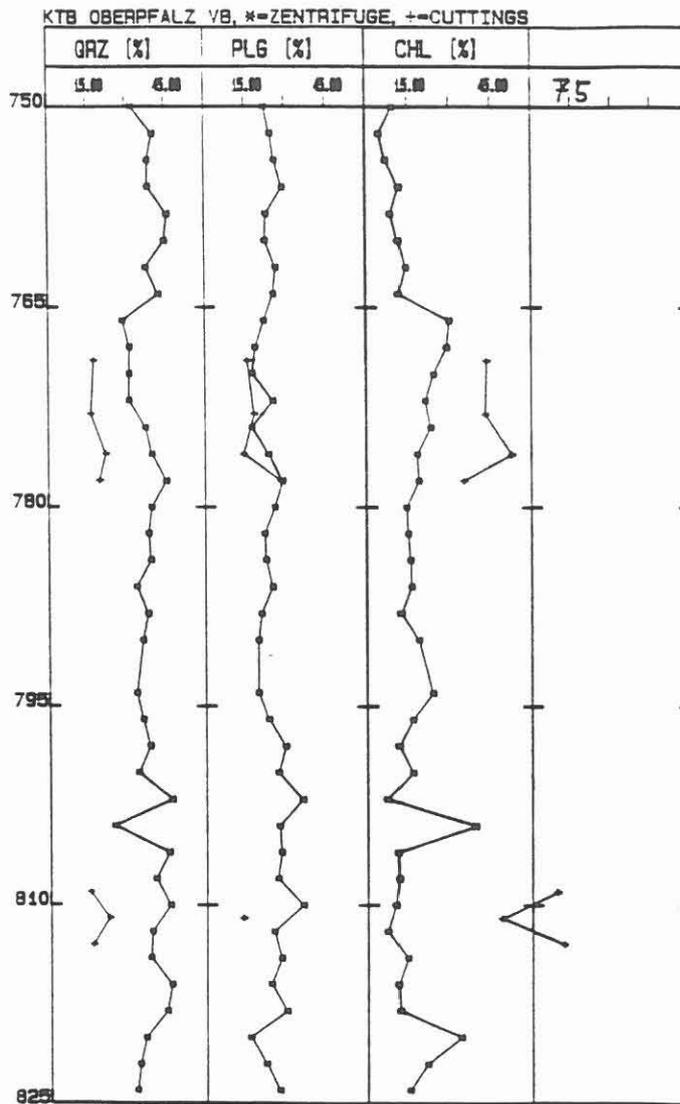


Abb. C.3.2: Vergleich der Gehalte von Quarz, Plagioklas und Chlorit in Zentrifugenproben (*) und Cuttings (+) bei Anwendung der Seilkerntechnik mit Diamantbohrwerkzeugen.

C. 4 Spülanalytik

C. 4.1 Funktionsprinzip der ICP-AES

Die Bestimmung der Kationen in der Bohrspülung erfolgt mit Hilfe der ICP-Atomemissionsspektrometrie. Im KTB-Feldlabor steht dafür ein ICP-AES-Gerät der Firma ARL (3580, Vakuum) zur Verfügung. Die Gerätekonfiguration umfaßt folgende Komponenten:

- (a) Hochfrequenzgenerator (Induktionsspule)
- (b) Plasmabrenner (Fackel, Plasma- und Kühlgasstrom)
- (c) Zerstäubereinheit (Zerstäuber, Zerstäuberkammer)
- (d) Spektrometer (Primärspalt, Gitter, Sekundärspalt, Photomultiplier)
- (e) Datenverarbeitungssystem

Das Gerät verfügt über zwei Spektrometerkammern, wobei im Monochromator die sequenzielle Analyse beliebiger Elemente möglich ist, während im Polychromator die simultane Analyse von 11 ausgewählten Elementen durchgeführt werden kann (s.Tab. C.4.1).

Der prinzipielle Aufbau eines ICP-AES ist in Abb. C. 4. 1 dargestellt. Die Probenlösung wird mittels einer peristaltischen Pumpe in einen Zerstäuber (Meinhard-Zerstäuber) eingeleitet. Das durch den Zerstäuber erzeugte Aerosol wird in der Zerstäuberkammer zu 90 - 95% als Kondensat abgeschieden und verworfen. Nur das feinste Probenaerosol gelangt in ein Plasma, das durch induktive Erhitzung in einer Hochfrequenzspule erzeugt wird. Die Verdampfung der Probenlösung und die Anregung der in ihr enthaltenen Atome erfolgt bei Temperaturen von 5000 bis 10000 °C. Die temperaturabhängigen Vorgänge im Plasma sind in Abb. C. 4. 2 schematisch dargestellt. Die Atome kehren unter Abgabe von Strahlung der Energie $\Delta E = h \cdot \nu$ vom angeregten in den Grundzustand zurück. Das Boltzmannsche Verteilungsgesetz beschreibt die physikalische Grundlage der Atomemission.

$$N_E / N_0 = (G_E / G_0) \cdot \exp \cdot (\Delta E / k \cdot T)$$

- N_0 = Anzahl der Atome im Grundzustand
- N_E = Anzahl der Atome im angeregten Zustand
- G = Statistischer Faktor
- k = Boltzmann-Konstante
- T = Absolute Temperatur

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

- h = Plancksches Wirkungsquant
- ν = Frequenz

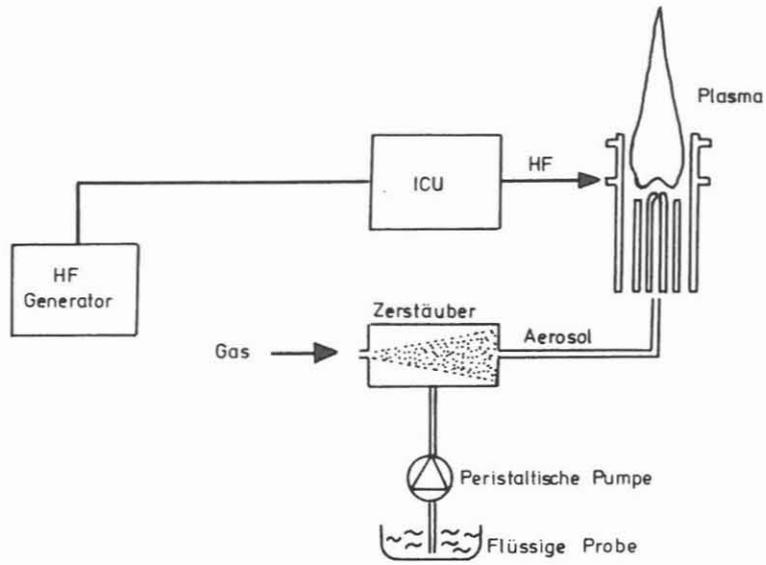


Abb. C. 4. 1 Prinzipieller Aufbau eines ICP-AES

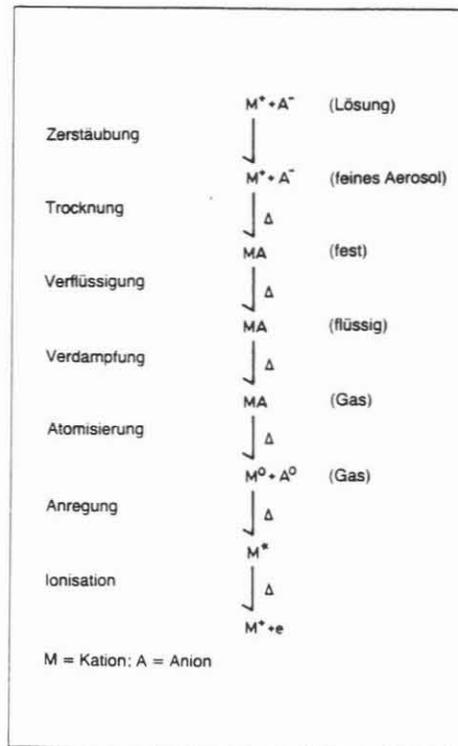
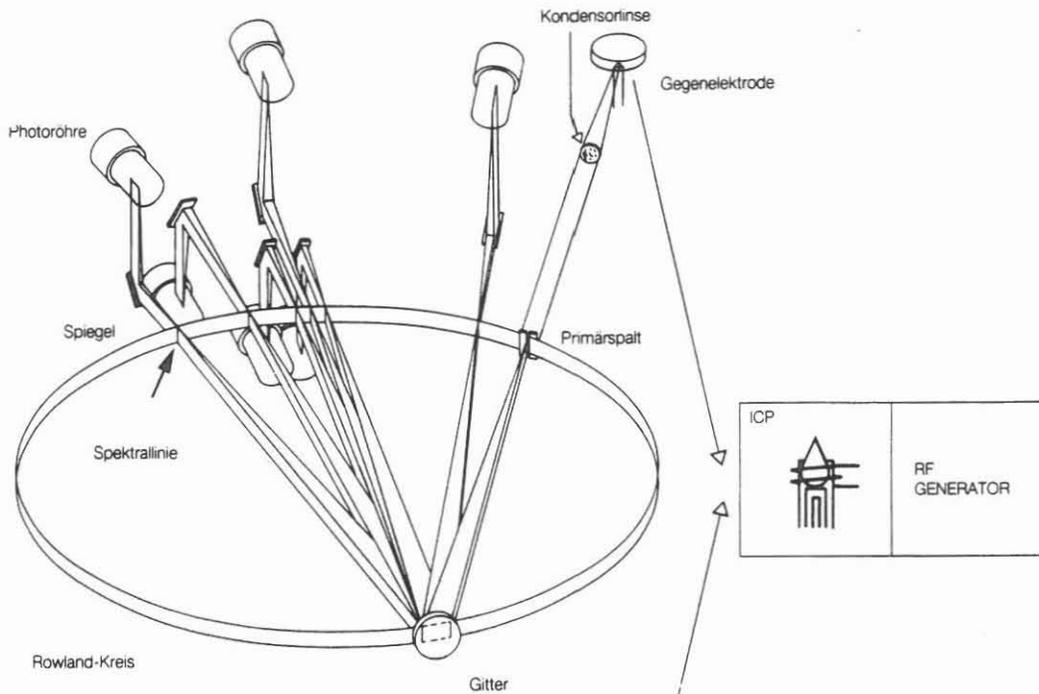


Abb. C. 4. 2 Prozesse in einem induktiv gekoppelten Plasma (nach Schrader et al., 1981)

STRAHLENGANG IM POLYCHROMATOR



STRAHLENGANG IM MONOCHROMATOR

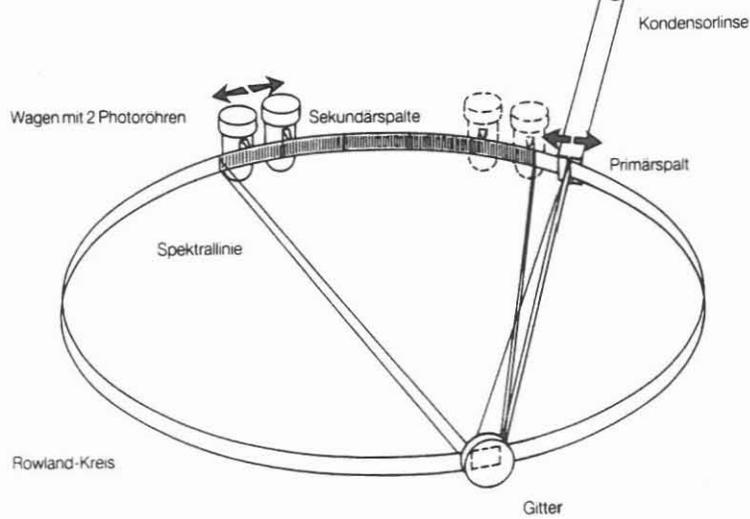


Abb. C. 4. 3 Strahlengang im Monochromator und im Polychromator des ICP-AES 3580 der Fa. ARL
Das erzeugte Emissionsspektrum wird im Spektrometer durch

ein Konkavgitter in einzelne, elementspezifische Spektrallinien zerlegt (s. Abb. C. 4. 3).

Die Intensitäten der Spektrallinien sind ein Maß für die Konzentration der Elemente.

C. 4. 1. 1 Geräteparameter und verwendete Meßprogramme

In Tabelle C. 4. 1 sind die für die Spülungsanalytik ausgewählten Elemente und die jeweils verwendeten Spektrallinien aufgeführt.

Tab. C. 4. 1 Für die Spülungsanalytik verwendete Spektrallinien

Element	Wellenlänge (Å)	
Na	5895.92	
Ca	3933.66	simultane Messung
K	7664.91	Polychromator
Li	6707.84	
Sr	4077.71	
Ba	4554.03	
Fe	2599.40	sequentielle Messung
Mg	3838.26	Monochromator
Mn	2576.10	
Zn	2138.56	

Für die Eichung der Spülungsanalysen werden Standardlösungen (Fixanal Eichlösungen) verwendet. Die Eichkurven (3 - Punkt Eichung) werden so angesetzt, daß die Elemente in der Probenlösung im mittleren Konzentrationsbereich der Eichkurve gemessen werden können. Bedingt durch die nötige Verdünnung der Spülproben werden die Elemente Na, Ca, K, Fe und Mg in der Eichkurve in Konzentrationsbereichen von 1 bis max. 40 ppm angesetzt. Die Konzentrationsbereiche der Eichkurve für die Elemente Li, Sr, Ba, Mn, und Zn variieren zwischen 10 bis max. 500 ppb. Innerhalb dieser Konzentrationsbereiche werden für die Elemente Na, Ca, K, Fe, Mg, Li, Sr, Ba und Mn Reproduzierbarkeiten von 1 bis 3 % relativer Standardabweichung ermittelt. Für das Element Zn beträgt die relative Standardabweichung $\leq 6\%$.

C. 4. 2 Ergebnisse der Kationen- und Anionenanalyse des Teufenbereichs 992 - 1530 m

Bis in eine Teufe von 992 m haben die Bohrspülungsanalysen gezeigt, daß Änderungen im Chemismus der Bohrspülung einerseits von den aus bohrtechnischen Gründen in das Spülungssystem eingeleiteten Stoffen wie Dehydril, Leitungswasser, NaOH und Natriumkarbonat abhängen, andererseits aber auch eindeutig verursacht werden durch Austauschreaktionen zwischen dem erbohrten Gestein und der Bohrspülung.

Die Lokalisierung von Zuflußhorizonten mineralisierter Wässer setzt voraus, daß zu jeder Zeit während des Bohrvorgangs die chemischen Bestandteile aus den Spülungszusätzen bilanziert und die Wechselwirkungen zwischen Bohrmehl und Spülung quantitativ erfaßt werden können.

Die Ergebnisse der Bohrspülungsanalysen des Teufenbereiches 992-1530 m sind in Übersichtslogs (Maßstab 1:1000) im Anhang dargestellt.

In Tab. C. 4. 2 sind die mittleren Kationen- und Anionengehalte ausgewählter Teufenabschnitte zwischen 992 - und 1530 m sowie die unterschiedlichen technischen Einleitungen in das Spülungssystem während dieser Bohrphase zusammengefaßt. Zusätzlich aufgeführt ist die chemische Analyse einer 1%-igen synthetischen Probe des Spülungszusatzes Dehydril. Hauptbestandteile des Dehydrils sind die Elemente Si, Mg, Na und Li. Die Li- und Mg-Gehalte in der Bohrspülung ermöglichen jederzeit die genaue Berechnung der aktuellen Konzentration des Spülungszusatzes in der Spülung und damit auch die Erfassung der Grundgehalte der anderen durch das Dehydril in die Spülung eingebrachten Elemente.

Beim Erreichen der Teufe 992 m weist die Bohrspülung eine 1%-ige D-HT-Konzentration auf. Durch Austauschreaktionen mit Mineralen der bis 992 m durchteuften glimmerreichen Gneise hat die Spülung im Vergleich zu der 1%-igen synthetischen Dehydril-Probe erhöhte Gehalte an K, Ba, Ca, Sr, Fe und Mn sowie an Cl^- und SO_4^{2-} . Im Anschluß an die Bohrlochmeßphase bei 992 m wurden während Nachbohrarbeiten und Drill Stem Tests Wasser, NaOH und höher konzentrierte "frisch" angesetzte D-HT-Spülung eingeleitet. Zu Beginn der ersten Richtbohrphase zwischen 995 m und 1229 m weist die Spülung dadurch eine 1.6%-ige D-HT-Konzentration auf.

An Hand der Analysen des Teufenbereichs zwischen 1079 - 1096m soll im Folgenden gezeigt werden, mit welcher Genauigkeit Bilanzierungen der chemischen Bestandteile der Bohrspülung bei Einleitungen in das Spülungssystem durchgeführt werden können. Die Bilanzierung der Gehalte einzelner Elemente bei Spülungseinleitungen läßt sich unter Verwendung folgender Gleichungen durchführen:

$$\text{Ausgangsspülung} \quad : \quad (K_E / 1 \cdot 10^6) \cdot V_A = K_E \quad (\text{kg})$$

$$\text{Spülungseinleitung} : (K_E^1 \cdot X \% \text{ D-HT} / 1 \cdot 10^6) \cdot V_E = K_E^1 \quad (\text{kg})$$

$$\text{Leitungswasser} \quad : \quad (K_E^2 / 1 \cdot 10^6) \cdot V_E = K_E^2 \quad (\text{kg})$$

Konzentration des
Elementes in der

$$\text{Mischung} \quad : \quad K_{EM} \text{ (ppm)} = ((K_E + K_E^1 + K_E^2) \cdot 1 \cdot 10^6) / (V_A + V_E)$$

- K_E = Konzentration des Elementes in der Ausgangsspülung (in ppm)
 K_E^1 = Konzentration des Elementes im 1%-igen synthetischen Dehydril (in ppm)
 K_E^2 = Konzentration des Elementes im Leitungswasser (in ppm)
 V_A = Spülmengemenge der Ausgangsspülung (in l)
 V_E = Eingeleitete Spülmengemenge (in l)
 K_{EM} = Konzentration des Elementes in der Mischung (in ppm)

Die Verwendung der oben beschriebenen Gleichungen soll am Beispiel der Mg - Gehalte in der Bohrspülung aufgezeigt werden.

Zwischen 1079 und 1086 m beträgt die Mg - Konzentration der Ausgangsspülung 2310 ppm (= 2,31 g/l). Das Spülvolumen beträgt in diesem Teufenbereich etwa 50 m³. Es berechnet sich 9999also ein gesamtter Mg - Gehalt von 115,5 kg in der Ausgangsspülung. Bei 1088 m werden 10 m³ einer 2,5%-igen D-HT-Spülung zugesetzt (Ansatz: 15 m³ 2,5% D-HT, 50 kg Na₂CO₃, 8 kg NaOH). Nach der Einleitung beträgt das Spülvolumen 60 m³. Eine 2,5%-ige D-HT-Spülung enthält 3450 ppm Mg; das entspricht einem Mg - Gehalt von 34.5 kg in der Einleitung. Über das Leitungswasser kommen noch etwa 0,08 kg Mg hinzu. Der Mg - Gehalt in der Mischung nach der Einleitung sollte dann 2500 ppm betragen. Die Bohrspülungsanalysen 1090 - 1096 m ergeben nach der Einleitung einen Mg - Gehalt von 2530 ppm. Dieses Beispiel verdeutlicht, daß selbst in Bohrphasen in denen Spülungseinleitungen durchgeführt werden, Abweichungen der Elementgehalte von der erwarteten Mischungszusammensetzung erkennbar bleiben. Zuflußhorizonte von Formationswässern oder mineralisierter Oberflächenwässer, die z. B. durch einen Elementeintrag von Na, Ca und Cl⁻ gekennzeichnet wären, können daher jederzeit eingegrenzt werden.

Tab. C. 4. 2 Spülungszusammensetzung (in ppm) des Teufenbereichs 992 - 1530 m. jeweils kurz nach einer Spülungseinleitung bzw. kurz vor der nächsten Spülungsänderung

Teufe	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	D-HT %
Spülungseinleitung												
synthetische 1%-ige D-HT Spülung	170	13	1.8	30	0.08	0.08	4	1380	n.d.	1	23	1.00
985 - 992 Logging - Phase	310	90	230	29	0.9	4.8	1010	1500	11.6	24.2	78	1.03
	versch. Spülungseinleitungen von Wasser und X % D-HT während Nachbohrarbeiten u. Drill Stem Tests											
995 - 1000	420	100	150	47	1.0	4.8	760	2280	10.3	34.9	94	1.61
1017	430	110	190	46	1.1	5.9	960	2320	12.6	40.8	97	1.61
5 m ³ 2.5 %												
1018	460	110	190	52	1.1	6.0	960	2510	12.9	-	-	1.78
1037	450	110	220	49	1.2	6.3	1080	2540	14.4	45.9	117	1.73
10 m ³ 2.5 %												
1042	420	100	170	49	1.0	5.3	820	2420	11.3	36.0	109	1.69
1070 - 1073	440	120	180	48	1.1	5.4	880	2320	12.2	38.6	114	1.64
2 kg NaOH												
1075	480	120	190	48	1.1	5.5	920	2350	12.5	36.2	113	1.65
1079 - 1086	500	110	190	47	1.1	5.5	920	2310	12.5	36.5	99	1.62
10 m ³ 2.5 %												
aus: 10 m ³ 2.5 % mit 50 kg Na ₂ CO ₃ und 8 kg NaOH												
1090 - 1096	840	90	150	52	0.9	4.6	750	2530	9.8	32.9	89	1.78
1106 - 1108	840	80	170	53	0.9	4.9	770	2570	10.3	33.2	95	1.81

Tab. C. 4. 2 Fortsetzung

Teufe Spülgseleinleitung	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	D-HT %
50 kg Na ₂ CO ₃												
1116	1260	80	180	54	0.9	5.2	820	2610	10.7	31.4	94	1.85
1138	1240	80	200	53	0.9	5.1	830	2590	10.7	39.9	95	1.82
50 kg Na ₂ CO ₃												
1144 - 1150	1670	80	230	54	1.0	5.7	890	2610	11.2	45.0	99	1.85
5 m ³ 2.5 % mit Rest Na ₂ CO ₃												
1156	1720	70	190	56	0.9	5.0	780	2720	10.1	34.0	103	1.92
1174	1660	80	180	55	1.0	5.0	840	2700	10.7	37.5	105	1.89
15 m ³ Ansatz												
5 m ³ 2.5 % + 15 m ³												
2.5 % mit 50 kg Na ₂ CO ₃ + 5 kg NaOH												
1190 - 1200	1720	100	190	59	0.9	4.6	730	2880	9.3	34.9	129	2.03
1210 - 1216	1600	100	190	58	0.9	4.8	820	2870	10.4	38.5	-	2.01
6 m ³ 2.5 %												
1224 - 1229	1540	90	180	60	0.9	4.5	790	2980	10.1	34.9	130	2.08
1226 - 1231	1500	100	200	58	1.0	4.7	820	2880	10.5	39.4	129	2.01
14 m ³ 0.7%												
1232 - 1236												
8 m ³ Ansatz s.o.												
1238 - 1244												
8 m ³ H ₂ O												
1245												
10 m ³ 0.6 %												
1246 - 1250	870	80	120	40	0.7	2.9	560	1960	7.0	32.1	89	1.38
1252 - 1255												

Tab. C. 4. 2 Fortsetzung

Teufe Spülungseinleitung	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	D-HT %
1277 - 1280 4 m ³ H ₂ O	880	100	140	40	0.7	3.0	620	2020	7.7	33.0	91	1.40
1288 - 1290	790	90	120	37	0.7	2.7	550	1850	6.9	30.7	93	1.29
1310 - 1312	790	110	120	36	0.8	2.7	620	1830	7.7	28.8	104	1.26
7 m ³ 1 %												
1318 - 1320	750	90	110	37	0.7	2.5	570	1870	7.3	24.1	96	1.29
5 m ³ 2 % Pille												
1321 - 1323	770	90	110	41	0.8	2.7	600	2040	7.7	26.6	102	1.42
8 m ³ 1 %												
1329 - 1332	740	110	100	41	0.9	n.b.	620	2090	7.8	28.7	98	1.44
1353 - 1356	720	120	110	40	0.8	2.9	660	2040	9.3	32.0	103	1.41
6 m ³ 1 %												
1368 - 1373	670	120	100	37	0.7	2.4	640	1950	8.3	25.8	104	1.32
4 m ³ 1 % u. Rest												
alte Spülung												
1380 - 1384	660	160	120	37	0.8	2.5	740	2050	9.2	29.9	112	1.36
7 m ³ 1 % u. Rest												
alte Spülung												
1399 - 1402	620	150	110	37	0.8	2.4	730	2000	9.1	34.5	115	1.34
1455 - 1459	620	200	130	39	1.1	2.9	970	2210	11.6	22.7	117	1.45
8 m ³ 1.25 %												
1462 - 1465	590	160	100	43	0.9	2.3	790	2330	9.4	28.2	129	1.56
1469	590	170	110	44	0.9	2.5	850	2370	10.2	27.2	127	1.59
8 m ³ 1.25 %												
1480 - 1487	580	180	120	43	1.0	2.5	860	2310	10.3	19.7	118	1.55
16 m ³ 1.25 %												
10 m ³ H ₂ O												
1499 - 1501	430	150	90	35	0.8	2.2	680	1960	8.1	16.1	91	1.29
1525 - 1528	460	170	100	38	1.0	2.2	730	1960	8.9	17.6	103	1.34

In der Tab.: C. 4. 3 wird diese Bilanzierung auch für die anderen analysierten Elemente durchgeführt. Der Vergleich der gemessenen Spülungszusammensetzung nach der Einleitung mit der berechneten Spülungszusammensetzung zeigt eine gute Übereinstimmung.

Tab C. 4. 3 Beispiel für eine chemische Bilanzierung im Spülungssystem

	Spülung vor der Einleitung Volumen 50 m ³ 1079 - 1086 m	Spülung nach der Einleitung * Volumen 60 m ³ 1090 - 1096 m	berechnete Spülung nach der Einleitung
Na	500	840	780
Ca	110	90	100
K	190	150	160
Li	47	52	52
Sr	1,1	0,9	0,95
Ba	5,5	4,6	4,6
Fe	920	750	770
Mg	2310	2530	2500
Mn	12,5	9,8	10,4
Cl ⁻	36,5	32,9	32,3
SO ₄ ²⁻	99	89	93,6

* Eingeleitet wurden 10 m³ einer 2,5%-igen D-HT-Spülung aus einem Ansatz: 15 m³ 2,5% D-HT, 50 kg Na₂CO₃, 8 kg NaOH; Leitungswasserzusammensetzung (siehe KTB - Report 88-1). Die Zusammensetzung der 2.5% igen D-HT Spülung läßt sich durch Umrechnung aus der Analyse der 1%igen sythetischen D-HT Spülung, dargestellt in Tabelle C. 4. 2., ermitteln

Aussagen über die Richtung von Austauschprozessen zwischen Spülung und Bohrmehl sind am eindeutigsten in Teufenbereichen zu treffen, in denen keine technischen Spülungseinleitungen erfolgt sind.

In Tab. C. 4. 2 sind daher die mittleren Elementgehalte der Bohrspülung kurz nach einer Spülungseinleitung bzw. kurz vor der nächsten Spülungsänderung zusammengefaßt.

Die Auswertung dieser Daten zeigt, daß die Spülung im Bereich der Paragneise, die zwischen 992 und 1160.5 m erbohrt wurden, K, Ba, Fe und Mn sowie Cl⁻ und SO₄²⁻ anreichert. Im Teufenbereich zwischen 992 und 1068 m fällt der pH-Wert der Spülung stark von pH = 9,6 auf pH = 7,96 ab. Die Analyse der Bohrspülung zeigt in diesem Teufenabschnitt eine Anreicherung an Fe und SO₄²⁻ (760 ppm Fe bzw. 94 ppm SO₄²⁻ bei 995 m auf 1080 ppm Fe bzw. 117 ppm SO₄²⁻ bei 1037 m ,s.Tab. C.4.2). Die RDA-Analysen belegen für den Teufenbereich zwischen 1024 und 1040 m eine Störungszone mit bis zu 4 Gew.-% Pyrit (s. C. 3. 1). In Laborversuchen konnte bereits gezeigt werden, daß der

pH-Abfall bei gleichzeitiger Fe und SO_4^{2-} -Anreicherung in der Spülung auf die Oxidation des Pyrits zurückgeführt werden muß (s. KTB Report 88-2).

Aus der Kationen- und Anionenanalyse im Teufenbereich zwischen 992 und 1090 m geht eindeutig hervor, daß die pH-Erniedrigung nicht auf einen Zufluß von Formationswässern zurückzuführen ist. Die Na, Ca, und Cl^- -Gehalte zeigen in diesem Teufenbereich relativ enge Variationsbereiche. Erst mit der Einleitung von insgesamt 150 kg Na_2CO_3 und 13 kg NaOH läßt sich eine Stabilisierung des pH-Wertes in einer Teufe von circa 1180 m erreichen. Der Na-Gehalt der Spülung liegt daher im Teufenbereich zwischen 1142 und 1200 m im Mittel bei 1700 ppm. Der hohe Na_2CO_3 -Anteil in der Spülung bewirkt eine chemische Ausfällung des Calciums in Form von CaCO_3 . Im Teufenbereich zwischen 1090 und 1260 m beträgt der mittlere Ca-Gehalt in der Spülung nur noch 80 ppm. Nach Ende der Richtbohrphase, zu Beginn der Bohrphase mit der Seilkerntechnik bei 1229 m, wurde der Dehydrilgehalt in der Bohrspülung durch Einleitung von Wasser und neu angesetzter Spülung auf eine D-HT-Konzentration von 1.4 % erniedrigt (s. Tab. C. 4. 2).

Charakteristisch für den Teufenbereich zwischen 1260 und 1530 m ist eine kontinuierliche Anreicherung der Elemente Ca, Sr, Fe, Mn und SO_4^{2-} sowie eine Verarmung von Cl^- und Na (s. Tab. C. 4. 2). Die K- und Ba-Gehalte bleiben in diesem Teufenbereich nahezu konstant. Die Anreicherung von Ca, Sr, Fe und Mn beruht auf Austauschreaktionen der D-HT-Spülung mit den ab 1160 m durchteuften biotit-, granatführenden Amphiboliten bzw. Metabasiten und "Ultra"-Basiten, die mittlere Amphibol-Gehalte von 40 Gew.-% aufweisen.

In Laborversuchen konnte festgestellt werden, daß Austauschprozesse zwischen Amphibol und D-HT-haltiger Spülung zu einer Anreicherung von Ca, Sr, Fe und Mn in der Spülung führen können (s. KTB-Report 88-2).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß auf Grund der Ergebnisse der Spülungsanalytik im Teufenbereich zwischen 992 und 1530 m keine Zuflußhorizonte höher mineralisierter Oberflächen- bzw. saliner Formationswässer festzustellen sind. Die Elementanreicherungen von K, Ba, Ca, Sr, Fe und Mn sowie Cl^- und SO_4^{2-} beruhen auf Reaktionen der Spülung mit Mineralphasen wie Glimmer, Plagioklas, Amphibol, Calcit und Pyrit.

Um die pH- bzw. Temperaturabhängigkeit dieser Spülungs- / Gesteinswechselwirkungen näher zu untersuchen, werden z. Z. Langzeitversuche in Zusammenarbeit mit der Firma Henkel durchgeführt, die freundlicherweise Druckautoklaven für Versuche bei Temperaturen größer als 100°C zur Verfügung gestellt hat.

Für diese Untersuchungen wurden 3 Kernproben (zwei Amphibolite und ein Gneis) aus dem Teufenbereich zwischen 274 und

602 m ausgewählt. In der Tabelle C. 4. 4 ist der Mineralbestand dieser Proben aufgeführt. Tabelle C. 4. 5 zeigt die Ergebnisse von Leachig-Versuchen, die bei 50°C in verschließbaren Kautex-Flaschen durchgeführt wurden. Jeweils 1 g Gesteinsmehl ($\leq 63\mu$) wurde mit 100 g D-HT-Spülung versetzt (Probe aus dem Reservetank, mit Leitungswasser angesetzt) und dann nach 14, 28 bzw. 41 Tagen untersucht. Die Zusammensetzung der Ansatzspülung (Reservetank) für diesen Versuch ist ebenfalls dargestellt.

Die Elemente Ca, Fe, Mn und Zn werden durch Austauschreaktionen des Amphibols und vor allem des Calcits (bezogen auf die steigende Ca-Gehalte) in der Spülung angereichert. In der mit Gneis versetzten Spülung sind hingegen die Elemente K, Ba, Fe, Mn und Al angereichert. Eine Verlängerung der Versuchsdauer bewirkte keine Veränderung der Kationengehalte. Die SO_4^{2-} -Gehalte sind in der pyrithaltigen Amphibolitprobe (41A1R) aus der Teufe 274.4 m deutlich gegenüber der Ansatzspülung erhöht. Die Verlängerung der Versuchsdauer auf 41 Tage führte bei diesem Gestein jedoch zu einer weiteren SO_4^{2-} -Anreicherung bis auf 182 ppm in der Spülung dieser Probe.

Tab. C. 4. 4 Mineralogische Zusammensetzung von Kernproben, die für Leaching - Versuche ausgewählt wurden (Gew.-%)

KM/Sekt. Teufe	41A1R 274,4	50D14T 353,74	112F3bT 601,82
Quarz	-	-	34
Kalifeldspat	11	13	-
Plagioklas	44	50	21
Biotit	-	-	14
Hornblende	30	18	-
Chlorit	14	9	13
Muskovit	-	-	17
Prehnit	-	6	-
Calcit	-	3	-

Austauschreaktionen zwischen der D-HT-Spülung und dem Gesteinsmehl können jedoch eine Al-Anreicherung von 9 ppm in der Ansatzspülung auf 200 ppm in der mit Gneis versetzten Spülung nicht befriedigend erklären. Wegen seiner Immobilität bei hydrothermalen Alterationsprozessen wird das Element Al in der Literatur häufig zur Normierung von Elementverhältnissen verwendet. K/Al-Verhältnisse von etwa 0.35 in der mit Gneis versetzten Spülprobe legen die Interpretation nahe, daß feinschuppige Schichtsilikate, wie z.B. Muskovit (K/Al etwa 0.48) und Biotit in die Gel-Struktur des Dehydrils mit eingebaut werden. Der aus den oben beschriebenen Laborversuchen abgeleitet Einbau von Schichtsilikaten in die Gelstruktur des Dehydril bestätigt sich auch in den Bohrspülungsanalysen.

Tab. C. 4. 5 Leaching - Versuche bei 50°C, D-HT-Spülung und aufgemahlenes Kernmaterial, 1 g Gesteinsmehl auf 100 ml Spülung (alle Angaben in ppm)

Versuchsdauer (in Tagen)	Probe Teufe	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Zn	Si	Al	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
14	D-HT	350	30	20	53	0.2	0.6	6	2430	0.1	0.1	-	9	23	104
28	Ansatzspülung	360	30	10	53	0.2	0.6	9	2370	0.1	0.4	4110	-	-	-
41	1.8 % D-HT													13	65
14	41A1R *	350	70	20	50	0.3	0.6	150	2360	1.5	0.6	-	90	14	141
28	274.4m	350	70	20	51	0.3	0.7	170	2410	1.7	0.9	4220	90	-	-
41	Amphibolit													14	182
14	50D14T	370	260	20	54	0.4	0.6	120	2560	1.8	0.6	-	90	20	-
28	353.74m	370	270	20	54	0.4	0.6	150	2550	1.9	0.9	4420	-	-	-
41	Amphibolit													13	118
14	114F3bT	340	40	70	51	0.4	1.0	80	2360	1.0	0.7	-	200	21	105
28	601.82m	350	50	80	52	0.4	1.1	90	2360	1.1	0.8	4400	210	-	-
41	Gneis													12	102

* Probe 41A1R enthält sichtbar Pyrit; der Pyritgehalt liegt jedoch unterhalb der Nachweisgrenze der RDA (< 1 Gew.%).

Ab einer Teufe von 1700 m wird eine kontinuierliche Al - Messung in der Spülung durchgeführt. Es wurden im Mittel K - Gehalte von 250 ppm und Al - Gehalte von 750 ppm bestimmt. Das Bohrmehl kann aus der verdünnten Spülprobe wegen der Adsorptionseffekte für positiv geladene Ionen und der kolloidalen Struktur des D-HT nicht durch Filtration entfernt werden (siehe KTB Report 88-1). Das Bohrmehl wird daher bei der Aufbereitung aus der verdünnten Spülprobe auszentrifugiert. Aber auch durch eine Verlängerung der Zentrifugierdauer (bis zu 5 h bei 5000 U/min) lassen sich die eingebauten Schichtsilikate nicht von den kolloidalen Partikeln des Spülgugszusatzes entfernen. Denkbar ist ein Einbauprozeß der schichtparallelen Verwachsungen ähnelt ("mixed-layer"-Minerale), welche vor allem typisch für Tonminerale sind.

Diese Ergebnisse lassen es sinnvoll erscheinen, zukünftig anstelle des NaOH zur pH - Einstellung der Spülung KOH zu verwenden, da die Bohrspülungsanalysen in Bezug auf die Gehalte an K durch den oben beschriebenen Schichtsilikateinbau in die Gelstruktur des Dehydril verfälscht sind. Dies hätte auch den Vorteil, daß Zutrittshorizonte von migrierenden Wässern durch niedrigere Na - Gehalte in der Bohrspülung leichter auffindbar wären, da das Element Na Hauptkation in den meisten natürlichen Wässern ist.

C. 4. 3 Dekrepiationsanalytik

Im Berichtszeitraum wurde zusätzlich erstmals die Analyse fluider Einschlüsse mit Hilfe des ICP-Dekrepiationsverfahrens durchgeführt. Gegenüber mikrothermometrischen Untersuchungen an Flüssigkeitseinschlüssen, die einerseits äußerst zeitaufwendig sind und andererseits nur einen indirekten Hinweis auf die Lösungstemperaturen und den Chemismus der Einschlüsse geben, hat das Dekrepiationsverfahren den Vorteil, daß die Zusammensetzung der Einschlüsse direkt gemessen werden kann.

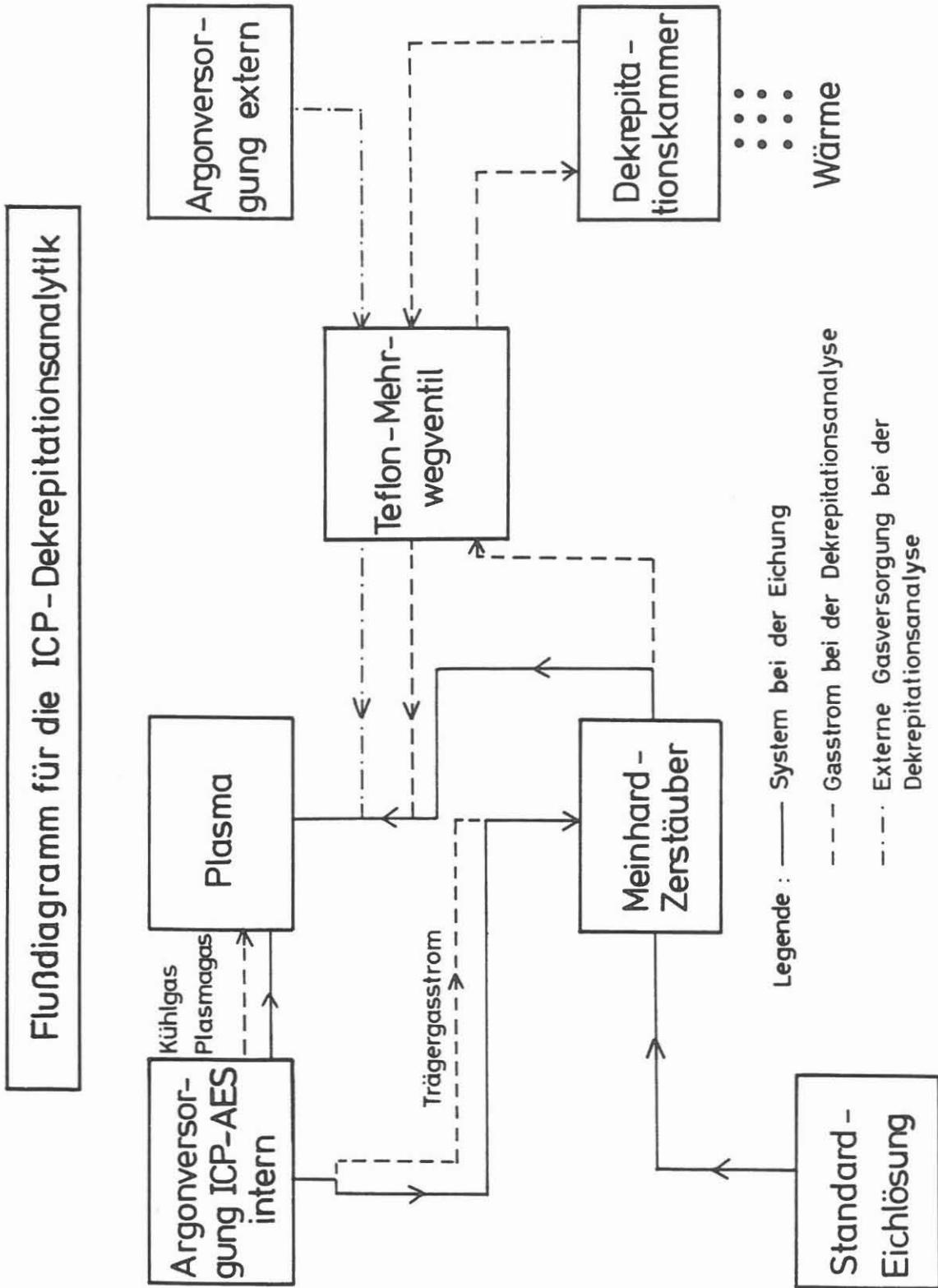
Meßprinzip:

Die ICP-Dekrepiationsmethode wurde am Imperial College in London von der Arbeitsgruppe M. Thompson et al. (1980) entwickelt. Die Anfertigung der Dekrepiationsanlage erfolgte am Geochemischen Institut der Universität Göttingen nach dem Vorbild einer entsprechenden Meßeinrichtung am Imperial College in London.

Das Grundprinzip der Messung besteht darin, daß ein schnelles Aufheizen von Kristallen, die Flüssigkeitseinschlüsse enthalten, zur Dekrepiation des Wirtsminerals führt. Ausschlaggebend für das Zerbersten des Wirtsminerals ist der plötzliche Anstieg des internen Flüssigkeitsdrucks bei thermischer Energiezufuhr. Der Inhalt der Flüssigkeitseinschlüsse wird als feines Spray freigesetzt und verdampft. Die Dekrepite werden dann in einem Argonstrom ins Plasma des ICP-AES eingeleitet.

In Abb C. 4. 4 ist schematisch die Meßanordnung für die Dekrepiationsanalyse dargestellt. Für die Dekrepiationsmessung wird der Zerstäuber aus der Zerstäuberkammer des ICP-AES entfernt. Der Trägergasstrom, der den Zerstäuber verläßt, wird zunächst über ein Mehrwegventil in die Dekrepiationskammer geführt. Die Dekrepiationskammer, die die Probe (zumeist Quarz Separate ~ 500 mg) enthält, besteht aus einem Quarz - Reagenzglas ($\phi = 20$ mm, Länge 18 cm), welches in die Bohrung eines elektrischen Ofens eingebracht wird. Der elektrische Ofen wird mittels eines Thermoelements und eines Ein/Aus - Reglers auf die gewünschte Temperatur eingestellt (bei Routine - Messungen 650°C). Der Trägergasstrom führt die Dekrepite beim Verlassen der Dekrepiationskammer über das Mehrwegventil direkt ins Plasma. Die externe Argonversorgung des Plasmas über das Mehrwegeventil ermöglicht ein Wechseln der Proben in der Dekrepiationskammer. Die Eichung der Dekrepiationsanalysen erfolgt durch Zerstäubung von Standardlösungen bekannter Zusammensetzung.

Abb. C. 4. 4:



Voraussetzung für die Dekrepatationsanalyse ist die simultane Messung aller Elemente, da das Zerplatzen der Einschlüsse nur während eines sehr kurzen Zeitraumes - im 10er Sekundenbereich - stattfindet. Routine - Messungen werden bei einer Vorintegrationszeit von 15 sec und einer Intergrationszeit von 45 sec durchgeführt.

Das ICP-AES im Feldlabor ist für simultane Analysen mit 10 feststehenden Photoröhren zur Messung der Elemente Na, Ca, K, Li, Si, Al, P, S, Zn und Sc ausgestattet. In der Tabelle C. 4. 6 sind die zur Analyse ausgewählten Spektrallinien dieser Elemente aufgeführt.

Tab. C. 4. 6 Wellenlängen der ausgewählten Spektrallinien

Element	Wellenlänge (Å)	mögliche spektrale Interferenzen
Ca	3933.66	Sc, Ti ⁽¹⁾ , V ⁽²⁾
Al	3961.53	Co, Ti, Ce, Sm, Ca ⁽¹⁾ , V ⁽²⁾
P	1782,83	I ⁽¹⁾
S	1807,31	-
Na	5895,92	Fe, Ti, V ⁽²⁾
Zn	2138.55	Cu, V ⁽¹⁾ , Al, Fe, Ni, Ti ⁽²⁾
Li	6707.84	V, Ti ⁽²⁾
Sc	3613.80	Ce, Mo, Tb, Th, Dy, Zr ⁽¹⁾ , Cr, Cu, Fe ⁽²⁾
Si	2516.12	Yb, Mo, Hf, Cr, V ⁽¹⁾ , Fe, Mn ⁽²⁾
K	7664.91	Ti ⁽²⁾

(¹) Heinrichs et al. (1985)

(²) Winge et al. (1985)

Bei der Auswahl der Spektrallinien wurden intensitätsstarke, möglichst interferenzfreie Linien bevorzugt.

Ergebnisse und Diskussion:

Die Ergebnisse der ersten Dekrepatationsanalysen sind in Abb. C. 4. 5 in Form eines Dreieckplots der Hauptkationen (Σ Na + Ca + K) in den fluiden Einschlüssen dargestellt. Da das Ausmaß der Dekrepatation auch bei Wiederholungsmessungen an verschiedenen Teilmengen separierter Quarze derselben Probe unterschiedlich stark sein kann, ermöglicht die Dekrepatationsanalyse nur die Bestimmung der Elementverhältnisse. Die Berechnung der absoluten Elementgehalte aus der Dekrepatationsanalyse ist dann möglich, wenn die Salinität der fluiden Einschlüsse durch mikrothermometrische bzw. kryometrische Messungen (Heiz- bzw. Kühltisch) bekannt ist (Rankin et al., 1982). Salinitätsbestimmungen können jedoch im KTB - Feldlabor nicht durchgeführt werden.

Abb. C. 4. 5 A zeigt die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen, die an einer Quarzlinse aus dem Bereich des "Eckergneises" (Harz) durchgeführt wurden. Teilmengen von Quarz-Separaten dieser Probe wurden sowohl am Imperial College in London (dargestellt durch "X") als auch im KTB - Feldlabor (dargestellt durch ".") auf ihre Flüssigkeitseinschluß-Zusammensetzung untersucht. Die darstellenden Punkte der beiden Meßserien stimmen gut überein. Für die K/Na-Verhältnisse wird eine Reproduzierbarkeit von 10 %, für die Ca/Na-Verhältnisse von 5 % relativer Standardabweichung erzielt.

Abb. C. 4. 5 B zeigt die Ergebnisse der ersten Dekrepitationsanalysen, die an Separaten aus Quarzgängen der KTB - Vorbohrung (Teufen siehe Abbildungsunterschrift) durchgeführt wurden.

Hauptsächlich treten in diesen Quarzgängen sekundäre, ein- bis zweiphasige Einschlußbahnen auf. Die zweiphasigen Einschlüsse weisen neben einer flüssigen Phase eine " Gasblase " auf, die beim Abkühlen der im Quarz eingeschlossenen thermalen Lösung entstand. Die relative Größe des Blasenvolumens, bezogen auf das Gesamtvolumen des Flüssigkeitseinschlusses ist ein Maß für die ursprüngliche Temperatur der hydrothermalen Lösung. Je größer die Gasblase in mehrphasigen Einschlüssen ist, desto höher war die Temperatur der hydrothermalen Lösung. Die fluiden Einschlüsse aus Quarzgängen der KTB - Vorbohrung haben vorwiegend ein geringes Blasenvolumen von 1 - 3 Vol %. Hieraus läßt sich eine relativ niedrige ehemalige Lösungstemperatur ableiten (≤ 150 °C).

Die Einschlußanalyse (s. Abb. C. 4. 5) zeigt, daß Na das dominante Kation ist. Der relative Ca - Gehalt in der Σ Na + Ca + K variiert zwischen 2 bis 18 Gew%. Der K - Gehalt lag bei den ersten Dekrepitationsanalysen unterhalb der Nachweisgrenze.

Das K/Na - Verhältnis fluider Phasen im Gleichgewicht mit dem Alkalifeldspatsystem $K_2O - Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ ist temperaturabhängig. Je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch das K/Na - Verhältnis der Lösung. Ein relativ geringer K - Gehalt in den fluiden Einschlüssen spricht für eine niedrige Temperatur der Lösung, die zur Bildung der Einschlüsse geführt hat. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der oben beschriebenen Einschlußpetrographie.

Aus den Fluidanalysen läßt sich also prinzipiell eine Temperaturabschätzung der hydrothermalen Lösungen, die durch die fluiden Einschlüssen repräsentiert werden, durchführen.

C.5 Gasanalytik

Mit Hilfe der Bestimmung der in der Bohrspülung gelösten Gase ist es möglich, gasförmige und wäßrige Zuflußhorizonte zu lokalisieren und deren Gaszusammensetzung festzustellen. Im Gegensatz zu der analog durchgeführten Bohrspülungsanalytik liefert die Gasanalyse on line - Ergebnisse. Somit sind Änderungen in der Gaszusammensetzung sofort feststellbar.

Das Konzept einer kontaminationsfreien Bohrspülungsentgasung mit einem neu entwickelten Spülungsentgaser (NL - BAROID) konnte infolge technischer Schwierigkeiten bisher noch nicht realisiert werden. Deshalb wurde vorübergehend auf eine konventionelle Gasprobennahme (Quirlentgaser - GEODATA) zurückgegriffen. Dieser Quirlentgaser befindet sich zwischen dem Auslauf der Spülung und dem Schüttelsieb (Abb. C.5.1) in der vorbeifließenden Bohrspülung. Das von der Gasfalle freigesetzte Gas wird über eine Gasleitung zum Massenspektrometer gepumpt.

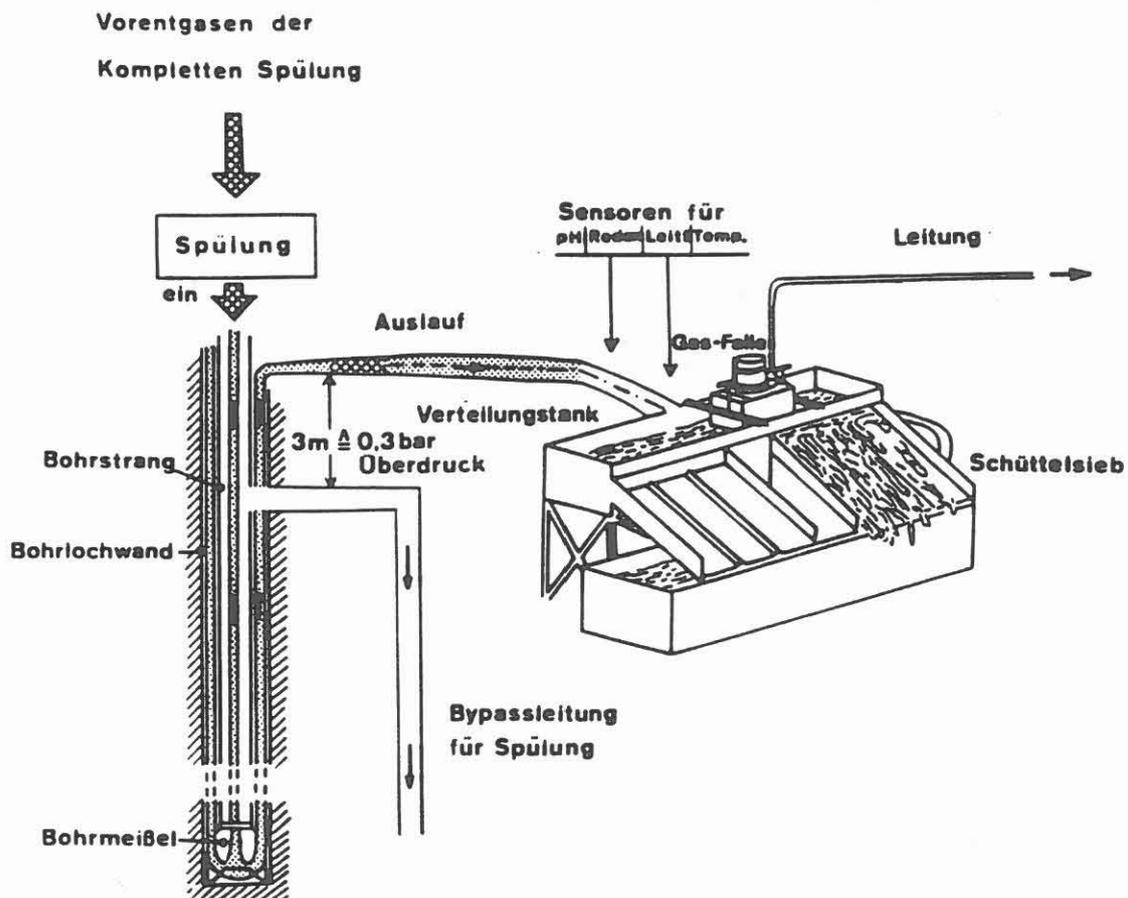


Abb. C.5.1: Schematische Darstellung der Gasprobennahme

Die gesamte zirkulierende Bohrspülung wird, bevor sie wieder durch den Bohrstrang ins Bohrloch gepumpt wird, über einen separaten Spülungsentgaser entgast. Die von diesem Entgaser freigesetzten Gase zeigen Luftzusammensetzung; d.h., die Bohrspülung wird schon beim Durchlaufen des Schüttelsiebs vollständig entgast und mit Luft equilibriert.

Über die vom Quirlentgaser freigesetzten Gasmengen lassen sich keine Aussagen machen, da weder die entgaste Bohrspülungsmenge und der Anteil an Fremdluft, noch die freigesetzte Gasmenge absolut bekannt sind. Die vom Quirlentgaser freigesetzte Gasmenge wird deshalb auf 100 % festgelegt, um einen Bezugspunkt bei der nachfolgenden Analyse der einzelnen Gasanteile festzulegen. Der Anteil der in der Bohrspülung gelösten Gasmenge muß jedoch sehr gering sein, da keine Gasbläschen in der Spülung beobachtet und die mit der Bohrspülung abgefüllten Polyäthylenflaschen nicht aufgebläht werden.

C.5.1 Funktionsprinzip des Prozeßgas-Massenspektrometers

Die Gasanalyse wird mit einem Prozeßgas-Massenspektrometer (MS) der Fa. VAKUUM GENERATORS durchgeführt. Das zu messende Gas wird innerhalb des MS in einer Ionenquelle ionisiert. Die Gasatome und/oder Gasmoleküle werden nach der Ionisierung in einem elektrischen Feld mit der Potentialdifferenz V auf eine Geschwindigkeit u beschleunigt. Ein Gasion der Masse m und der Ladung ze bekommt dann die kinetische Energie :

$$zeV = \frac{m \cdot u^2}{2}$$

Die beschleunigten Ionen gelangen in das Magnetfeld (Analysatorregion) des MS. Das magnetische Feld B übt eine Kraft ($B \cdot ze \cdot u \approx$ Lorentzkraft) auf die Gasionen aus. Die Richtung dieser Kraft ist senkrecht zu der magnetischen Feldrichtung und der Bewegungsrichtung der Ionen. Damit beschreiben die Ionen im Magnetfeld eine Kreisbahn, deren Krümmungsradius (R) sich aus dem "Gleichgewicht" zwischen Zentrifugalkraft ($m \cdot u^2 / R$) und der Kraft des magnetischen Feldes ergibt.

$$Bzeu = \frac{m \cdot u^2}{R} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{B \cdot ze}{m \cdot u}$$

Das magnetische Feld lenkt die monoenergetischen Ionen in Abhängigkeit ihres Masse/Ladungsverhältnisses ab. Die Ionen werden durch Blenden am Eingang und Ausgang der Analysatorregion "gefiltert". Der Ionenstrom wird am Magnetausgang mit einem Faraday-Becher oder Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) gemessen.

C.5.2 Ergebnisse des Teufenbereichs 992 - 1530 m

Im Anhang C.9.4 sind die Teufenlogs der gemessenen Gase dargestellt. Aufgetretene Datenlücken entstanden durch notwendige Umrüstungen am MS während der Bohrphase und sind durch 0-Meßwerte gekennzeichnet. Im Teufenbereich 1150 - 1240 m wurde die Position des Quirlentgasers in der Spülungsrinne (Sandfalle) ohne Rücksprache so geändert, daß die Gasfalle in der stehenden Spülung hing. Als freigesetzte Gasphase wurde in dieser Zeit nur Luft gemessen (Datenlücke).

Ganz allgemein ist die Gaszusammensetzung der aus der Bohrspülung freigesetzten Gase von den eingesetzten Bohrwerkzeugen (Rollenmeißel - Diamantbohrkrone) abhängig. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der eingesetzten Rollenmeißeln betrug weniger als 100 Umdrehungen pro Minute, während die eingesetzten Diamantbohrkronen bei mehr als 200 Umdrehungen pro Minute in Betrieb waren. Inwieweit auch eine Änderung der Bohrspülungszusammensetzung eine Rolle spielt, muß noch geklärt werden. Die Variationsbereiche der freigesetzten Gase während des Berichtszeitraums sind für beide Meißelarten in Tabelle C.5.1 zusammengestellt. Mit den eingesetzten Rollenmeißelwerkzeugen wurden keine Kerne erbohrt, sondern sie wurden nur für Richtbohrarbeiten eingesetzt.

Tab.C.5.1 : Variationsbereiche der freigesetzten Gase im Teufenbereich 992 - 1530 m

	Rollenmeißel			Diamantbohrkrone		
N ₂	78	-	92 %	78	-	97 %
O ₂	5.5	-	20.9 %	1.5	-	20.9 %
Ar	0.93	-	1.0 %	0.93	-	1.5 %
CO ₂	0	-	0.8 %	0	-	0.04 %
He	5	-	9 ppm	5	-	20 ppm
CH ₄	0	-	380 ppm	0	-	2200 ppm
H ₂	0	-	1000 ppm	0	-	16000 ppm

Im Teufenbereich 1228 - 1530 m wurde, wie schon erwähnt, das Seilkernbohrverfahren eingesetzt und somit kommt es infolge von Bohrkernentnahmen zu häufigen Abschaltungen der zirkulierenden Bohrspülung. Auf diese Weise werden die sehr stark variierenden Meßwerte verursacht, da diese Zirkulationsstill-

stände im Bereich des Quirlentgasers eine Equilibrierung der Bohrspülung mit der Luft bewirken und bei Zirkulationsbeginn durch O₂ - Anstieg und H₂ - Abnahme charakterisiert sind. Je nach Zeitdauer dieser Zirkulationsstillstände lassen sich nach Zirkulationsbeginn Bohrstillstandsgase (Tripgase), die meist aus dem Bereich der Bohrlochsohle stammen, feststellen. Diese Tripgase zeichnen sich durch deutlich höhere CH₄-, He- und CO₂ - Gehalte aus (Tab. C.5.2).

Tab.C.5:2 : Vergleich zwischen "erbohrten Gasen" und Bohrstillstandsgasen (Tripgase)

	Teufe 1492 m	"Tripgas"
CO ₂	0.02 %	0.03 %
He	8 ppm	11 ppm
CH ₄	180 ppm	950 ppm
H ₂	6100 ppm	930 ppm

Die Teufenlogs der unterschiedlichen Gase zeigen, daß sich N₂ und Ar umgekehrt zum O₂ verhalten. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine vermehrte N₂- und Ar- Freisetzung während des Bohrprozesses, sondern um eine O₂- Aufzehrung. Deswegen kommt es zu einer scheinbaren N₂- und Ar- Anreicherung, da die Meßergebnisse, wie schon erwähnt, immer auf 100% bezogen sind.

Die Eh- und pH - Meßwerte der Bohrspülung werden von der Mud Logging Unit (ARGE PREUSSAG, NL - BAROID und GEODATA) gemessen. Die Teufenbereiche, die sich durch niedrige O₂ - Gehalte auszeichnen, können ebenfalls durch niedrige Eh-Werte charakterisiert werden. Alle Eh-Werte, die kleiner 0 mV waren, wurden in diesem Bericht als 0-Meßwerte dargestellt (Software-Anpassung). In der folgenden Abb. C.5.2 ist ein direkter Vergleich zwischen den O₂ - Gehalten im freigesetzten Gas und den Eh - Werten der Bohrspülung dargestellt.

Trotz der häufigen Zirkulationsabschaltungen und der dadurch bedingten Equilibrierung der Spülung mit Luft lassen sich Zonen eingrenzen, die O₂-Minima aufweisen. Solche Bereiche befinden sich in folgenden Tiefen :

1070 - 1088 m	1380 - 1405 m
1100 - 1103 m	1430 - 1445 m
1113 - 1130 m	1465 - 1500 m
1300 - 1325 m	1510 - 1520 m

Diese Zonen müssen reduzierende Spezies, wie z.B. Sulfide und Graphit führen, um diese O₂-Abnahmen in der Bohrspülung produzieren zu können.

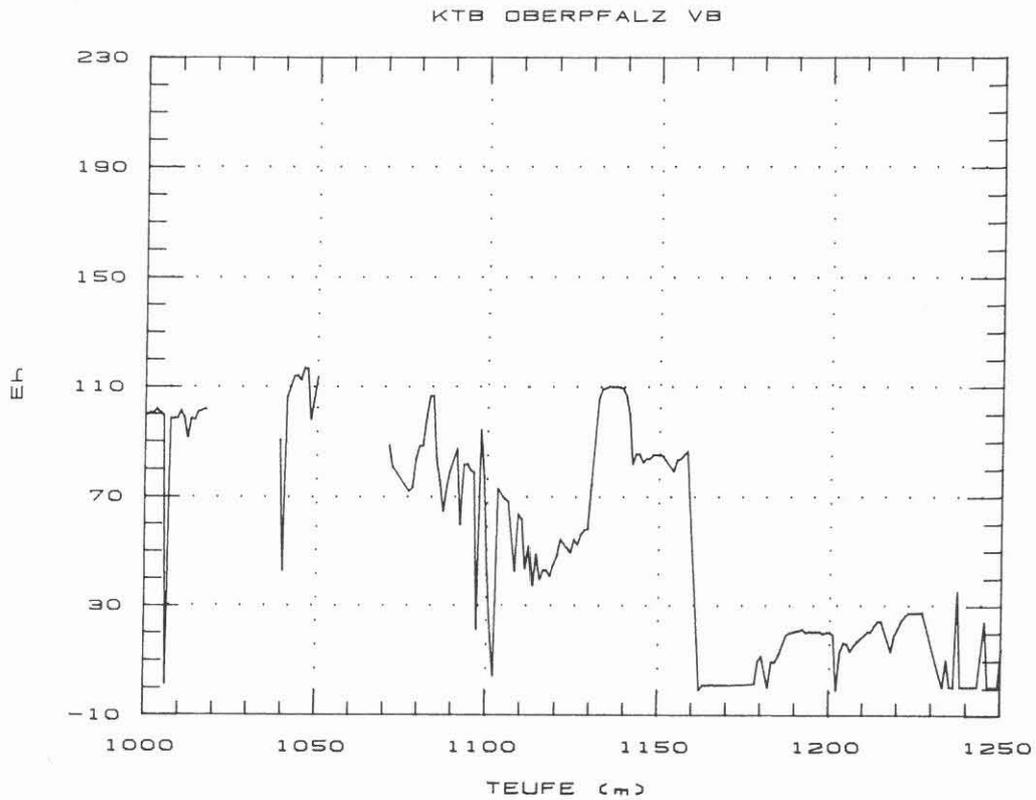
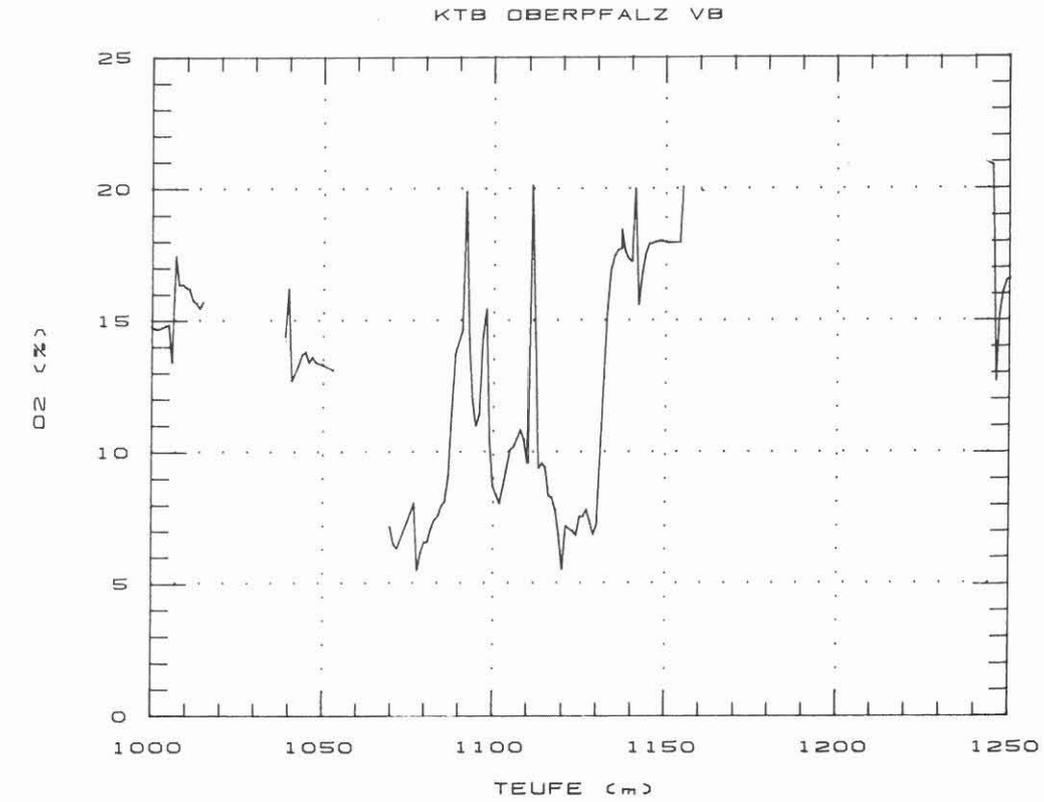


Abb.C.5.2 : Vergleich zwischen O₂-Gehalten der freigesetzten Gase aus der Bohrspülung und den Eh-Werten der Bohrspülung.

Bei Einsatz des Rollenmeißels (992 - 1228 m) werden nicht so niedrige O₂ - Gehalte erreicht wie beim Bohren mit Diamantkronen (1228- 1530 m). Die Ursache könnte in der Korngröße der anfallenden Feststoffe liegen, denn im Teufenbereich 992 - 1228 m fallen Cuttings und im anschließenden Teufenbereich Bohrmehl an. Das sehr fein aufgemahlene Gesteinspulver weist eine erheblich größere Oberfläche als die Cuttings auf. Durch diesen Oberflächeneffekt kann es sehr viel intensiver mit der Bohrspülung "reagieren" (O₂ verbrauchen).

Einzelne Bereiche zeichnen sich durch erhöhte CH₄ - Gehalte (>150 ppm) aus. Die Grenze bei 150 ppm ist willkürlich gewählt. Der "Backgroundwert" während des Bohrens liegt bei 100 ppm. Folgende Horizonte können als "CH₄ - Lieferanten" gekennzeichnet werden:

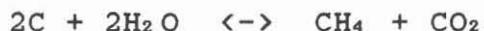
1070 m	1340 m
1100 m	1375 - 1380 m
1103 m	1405 m
1305 m	1505 - 1530 m

Die O₂-Minima und die CH₄-Maxima korrelieren sehr gut miteinander. Diese Zonen werden von der Arbeitsgruppe Geologie als graphitführende Horizonte identifiziert. In den Amphiboliten, ab ca. 1160 m, konnten makroskopisch keine graphitführenden Horizonte festgestellt werden. Die Gasanalytik belegt jedoch, daß zumindest geringe Graphitgehalte in den aufgeführten Teufenbereichen vorkommen müssen. An die graphitführenden Horizonte ist durchweg eine sulfidische Vererzung (meist Pyrit) gebunden. Diese Sulfidanreicherungen lassen sich mit den RFA/RDA - Analysen belegen, und stimmen ausgezeichnet mit den durch CH₄ - Peaks markierten Teufenbereichen überein.

Das durch den Quirlentgaser freigesetzte Methan könnte aus zwei unterschiedlichen "Quellen" bzw. aus Mischungen dieser "Quellen" stammen:

1. Methan wurde während der Metamorphose gebildet.
2. Methan wurde extern durch Infiltration und/oder Diffusion zugeführt (Ursprung: meteorisch, magmatisch oder metamorph).

Die graphitführenden Horizonte sind durchweg an Störungszonen gebunden. Deutlich treten diese Horizonte nur in den Gneisen auf. In den durchteuften Amphiboliten wurden, wie schon erwähnt, makroskopisch keine Graphitanreicherungen festgestellt. Somit könnte die Zersetzung von organischem Material aus den Sedimenten den Ursprung für den Graphit darstellen. Da die Störungszonen erst deutlich nach der Metamorphose der Sedimente angelegt wurden, müssen Transportprozesse für den Graphit stattgefunden haben. Der Graphit kann jedoch nur als Gasphase transportiert werden. Ein möglicher Transportmechanismus könnte nach dem folgenden Schema stattgefunden haben:



Graphite enthalten je nach den p - und T - Bedingungen ihrer Bildung noch bis in den Prozentbereich flüchtige Bestandteile (z.B. CH_4). Da in den graphitführenden Horizonten deutlich höhere Methangehalte auftreten, könnte der Graphit in Form von Methan transportiert worden sein.

Unter geologisch relevanten p - T - Bedingungen sind in einem C - O - H - S - System folgende Komponenten vorhanden: H_2O , CO_2 , CH_4 , H_2S , H_2 , CO und SO_2 .

Die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten und der Zusammensetzung der C - O - H - S - Fluide ist in Abb. C.5.3 dargestellt.

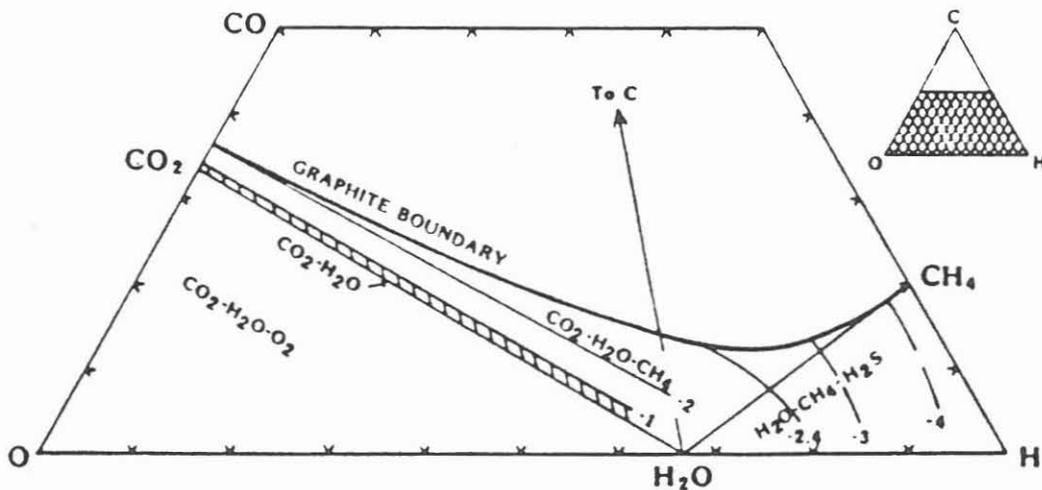


Abb. C.5.3: Zusammensetzung von C-O-H-S - Fluiden bei $T=1100^\circ\text{C}$ und $p=5000\text{bar}$. f_{S_2} ist definiert durch $\text{Fe}_{0.905}\text{S}$ (HOLLOWAY, 1981).

Das Diagramm C.5.3 wurde zwar für extrem hohe Temperaturen aufgestellt, aber es lassen sich doch einige generelle Beziehungen erkennen. Fluide, die ihren darstellenden Punkt auf der $H_2O - CO_2$ - Linie besitzen, bestehen aus den beiden Komponenten H_2O und CO_2 . Fluide, deren Zusammensetzung innerhalb der Grenzen $H_2O - CO_2$, $H_2O - CH_4$ und der Graphitgrenze (graphite boundary) liegt, sind $H_2O - CO_2 - CH_4$ - Gemische unterschiedlicher Zusammensetzung. Das Fluidzusammensetzungsfeld $O_2 - CO_2 - H_2O$ ist bei der Metamorphose noch nicht verwirklicht.

Fluide, deren C - Anteil größer ist als der Gehalt, der durch die Graphitgrenze markiert ist, sind in der Natur nicht gegeben. Solche Fluide bestehen dann aus Graphit sowie CH_4 , CO_2 und H_2O mit wechselnder Zusammensetzung. Die Anwesenheit von Graphit im Gestein limitiert somit die Zusammensetzung der koexistierenden C - O - H - S - Fluide.

Diese Zusammensetzung variiert auch mit der Temperatur (Abb. C.5.4).

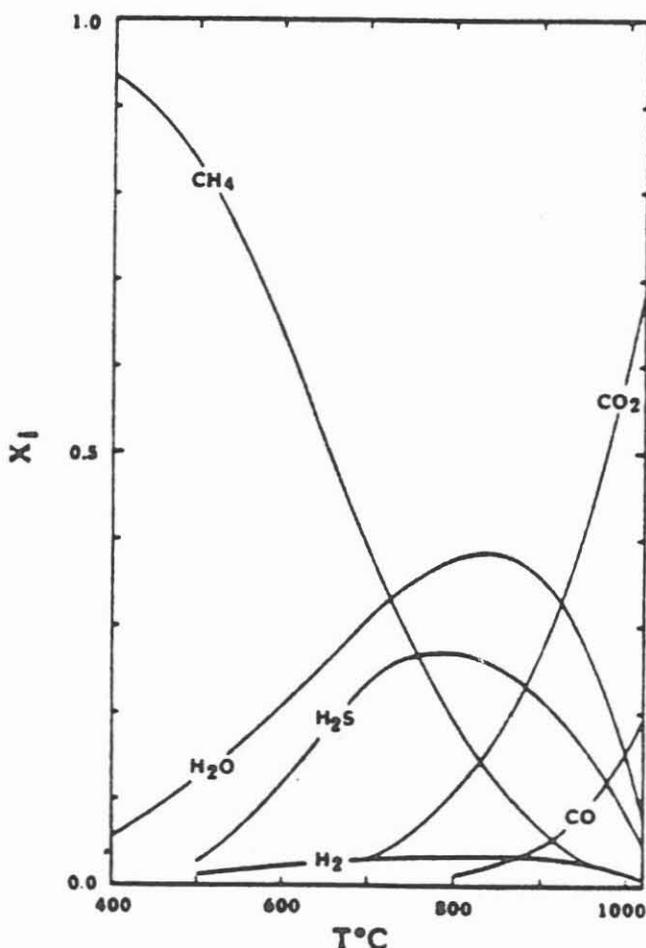


Abb. C.5.4.: Zusammensetzung von C-O-H-S - Fluiden bei Anwesenheit von Graphit. P, T und f_{s2} wie in Abb. C.5.4 (HOLLOWAY, 1981)

So sind die mit Graphit koexistierenden Fluide bei Temperaturen von 500°C überwiegend aus Methan und bei ca. 900°C hauptsächlich aus H₂O und CO₂ zusammengesetzt.

Die Graphitabscheidung aus der Gasphase (CH₄) benötigt "oxidierendere" Bedingungen und/oder p - T - Änderungen und könnte, wie schon erwähnt, analog der Gleichung



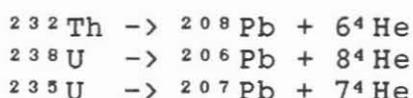
erfolgt sein. Das dabei freiwerdende Wasser könnte durch die Bildung von Chlorit aufgebraucht werden, da die Störungszonen durch Chloritanreicherungen charakterisiert sind (Tabelle C.5.3). Wird als primäre Quelle des Graphits organisches Material vorausgesetzt, so enthalten diese organischen Substanzen auch Schwefelverbindungen. Bei den Transportprozessen des Kohlenstoffs könnten die Schwefelkomponenten ebenfalls über eine Gasphase (H₂S) mittransportiert und in den Störungszonen als sulfidische Vererzung (meist Pyrit) ausgeschieden werden (Tab. C.5.3).

In den Störungszonen lassen sich nämlich neben Graphit - und Chloritanreicherungen auch meist Sulfidvererzungen nachweisen. Denkbar ist natürlich auch eine nachträgliche (nach der Graphitabscheidung) Vererzung.

Setzt man für die gemessenen He - Gehalte ebenfalls einen Grenzwert bei > 10 ppm fest, dann lassen sich folgende Tiefenbereiche lokalisieren, in denen He angereichert ist:

1305 m
1405 m
1515 - 1530 m

⁴He wird in der Natur durch radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium ständig neugebildet. Diese He - Bildungsprozesse laufen nach folgendem Schema ab :



Die reduzierende Wirkung des Graphits bewirkt eine Uranausfällung aus migrierenden uranhaltigen Lösungen und führt zu einer Urananreicherung in kohlenstoffreichen Horizonten. Dieser Prozeß ist in der Natur weit verbreitet. Erste U- und Th- Bestimmungen an einer graphitreichen Zentrifugenprobe (1992m) ergaben 18 bzw. 13ppm. In Erdkrustengesteinen beträgt das U/Th-Verhältnis ca.1:4, während es in dieser Probe 1.4:1 beträgt. Somit wurde das Uran in dieser graphitreichen Probe elementspezifisch angereichert.

Diese Ergebnisse legen nahe, daß die He-Anreicherung in den Gasen durch radiogen gebildetes He zustande kommt.

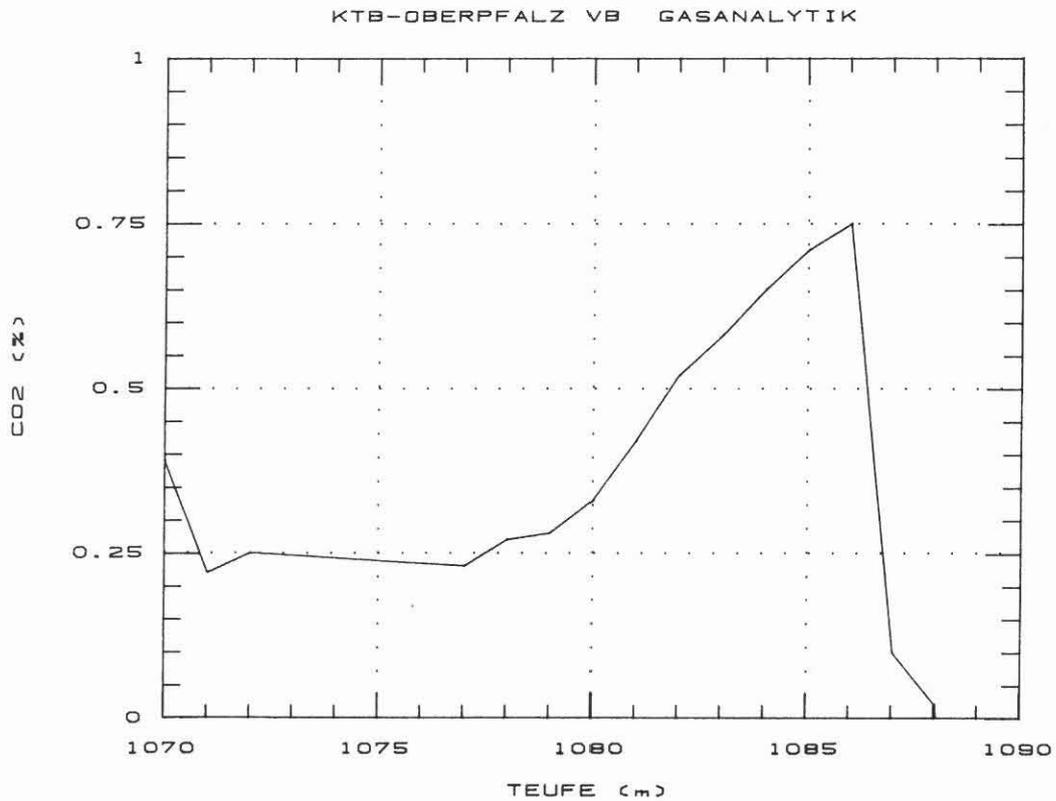
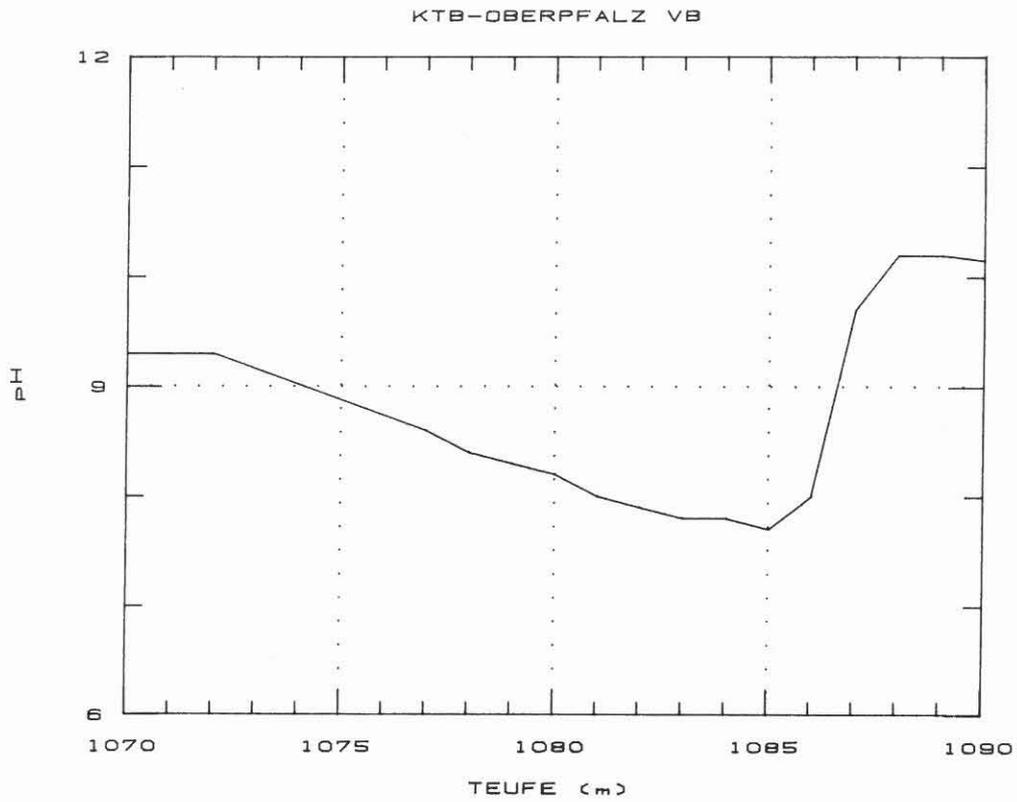


Abb. C.5.5: Vergleich zwischen den CO₂ - Gehalten der freigesetzten Gase aus der Bohrspülung und dem pH - Wert der Bohrspülung.

Im direkten Vergleich der Wasserstoff-Gehalte im Teufenbereich 992 - 1228 m (Rollenmeißel) und 1228 - 1530 m (Diamantkronen) kann deutlich aufgezeigt werden, daß ab 1246 m die H₂-Gehalte sprunghaft ansteigen. Bei den im Anhang graphisch dargestellten H₂-Gehalten des Teufenbereichs 1250 - 1550 m sind Diamantkronenwechsel durch \wedge - Symbole markiert. Dadurch wird sofort sichtbar, daß sich die H₂-Gehalte nach einem Wechsel des Bohrwerkzeuges ändern. Die H₂-Gehalte, die während der Bohrphase mit Rollenmeißel gemessen werden konnten, sind signifikant niedriger.

Somit kann eindeutig belegt werden, daß je nach Bohrkronentyp (Material) durch Wechselwirkung der Bohrkrone mit dem Gestein (Reibung) und der Spülung (H₂O) H₂ gebildet wird. Es muß sich bei den gemessenen H₂-Gehalten überwiegend um artifizielles Gas handeln.

Die durch den Quirlentgaser freigesetzten und mit dem MS gemessenen CO₂-Gehalte sind sehr gering. Sie werden in erster Linie durch den pH-Wert der Bohrspülung gesteuert.

In der Abb. C.5.5 ist diese Beziehung graphisch dargestellt.

Die Teufenbereiche, die durch erhöhte CO₂ - Gehalte markiert werden, zeigen sehr hohe Schwefelgehalte in den untersuchten Feststoffen. Inwieweit der pH-Wert der Bohrspülung mit den Schwefelgehalten der Feststoffe zusammenhängt wurde schon im Kapitel (Spülungsanalytik) ausführlich erläutert. Der pH-Wert hat großen Einfluß auf das rheologische Verhalten der Bohrspülung und wird deshalb durch technische Einleitungen von NaOH in das Spülungssystem auf einem "künstlichen" Level gehalten, wodurch ein Vergleich mit anderen Parametern nicht möglich ist. Eine systematische "Kartierung" dieser schwefelreichen Gesteinshorizonte kann daher nicht durchgeführt werden.

C.5.3 Festlegung von Störungszonen anhand chemischer Parameter

Mit Hilfe chemischer Parameter können die im Berichtszeitraum aufgetretenen Störungszonen charakterisiert werden. Dabei werden sowohl RFA -, RDA - als auch MS - Meßergebnisse zu Grunde gelegt. In erster Linie sind dies die Gehalte von Schwefel, Chlorit, Sulfiderze (Pyrit + Zinkblende), Methan, Helium und Sauerstoff. Für die einzelnen Elemente bzw. Minerale wurden die durchschnittlichen Grundgehalte ermittelt. Eine Überschreitung dieser "Backgroundwerte" dient zur Klassifizierung der Störungszonen. In der nachfolgenden Tabelle C.5.3 sind die durch chemische und mineralogische Parameter charakterisierten "Störungszonen" aufgeführt.

Tabelle C.5.3: Charakterisierung von "Störungszonen"

Tiefe (m)	Schwefel	Chlorit	Pyrit +Zinkbl.	Methan	Helium	Sauerstoff
992 - 996	X	X	XX	D1	D1	D1
1024 - 1040	XXX	X	X	D1	D1	XX
1102 - 1116	XX	X		D1	D1	X
1131 - 1135	X	X		D1	D1	X
1140 - 1162	X	X		D1	D1	D1
1178 - 1182	X	X		D1	D1	D1
1186 - 1190	X			D1	D1	D1

1230 - 1270	XXX	X	XX	XX		X
1295 - 1296	X	X	XX			
1299	X					
1302 - 1304	X	X	XX	XX	X	X
1318 - 1322	XX	X		XX		X
1340	XX	X		X		
1356	XX	X				
1360	X	X				
1364 - 1366	X					
1375 - 1380	XX	X	XX	X		X
1386	X	X		X		XX
1400	X					X
1406	XX			XX	X	XX
1446	X					X
1462	XXX	X	XX	XX		X
1466	XX	X	XX			XX
1468	X			X		X
1476 - 1478	XX			X		XX
1482 - 1486	XX	X		X		X
1490 - 1532	XXX		XX	XX	XX	XX

	"Background"	X	XX	XXX	
S	<1000	1000-5000	5000-10000	>10000	ppm
Pyr	-	≈1	>1		%
Chl	<10	10-20			%
He	0-10	10-20	>20		ppm
CH ₄	<150	150-300	>300		ppm
O ₂	20.9-10	10-5	<5		% D
O ₂	20.9-15	15-10	<10		% R

D = Diamantbohrkrone

R = Rollenmeißel

— = Übergang von Rollenmeißel zu Diamantbohrkrone

D1 = Datenlücke

C.6. Zusammenfassung

An dem im Teufenbereich 992 - 1530 m erbohrten Material wurde im 2 m Abstand eine quantitative Bestimmung des Stoffbestandes durchgeführt. Durch die Richtbohrarbeiten im Teufenbereich 992 - 1228 m konnte aus dieser Formation nur ein einziger Kern (KM 253) erbohrt werden. In diesem Bereich wurde der Probenabstand des Bohrkleins deshalb auf 1 m verdichtet.

Anhand der chemischen und mineralogischen Daten wurde der Versuch unternommen, ein lithologisches Profil zu erstellen. Die erzielten Ergebnisse zeigen eine monotone, alterierte Gneisserie die bei einer Teufe von 1160 m in eine Metabasitserie übergeht. Diese Metabasite weisen als Hauptgemengteile Amphibol und Plagioklas auf und sind teilweise sehr granatreich (bis 28 Gew.-%). Sie werden daher als Granat-Amphibolite bzw. Amphibolite bezeichnet. In dieser Abfolge konnten in den Teufenbereichen 1327-1337 m, 1381-1386 m, 1400 m und 1410 - 1416 m Meta-"Ultrabasite" (SiO_2 42 - 46 Gew.-%) nachgewiesen werden. Bei Teufe 1449.21 (Kernstück 300G1j) steht ein Serpentin (Serpentin 41 Gew.-%) an. Der Teufenbereich 1476 - 1532 m ist durch eine Abfolge von vererzten Bt- und granatführenden Hbl-Gneis und Amphiboliten gekennzeichnet.

Während der Richtbohrarbeiten konnten über einen großen Bereich zwei unterschiedliche Feststoffproben (Cuttings und Bohrmehl aus der Zentrifuge) untersucht werden. Durch die vergleichenden Untersuchungen konnte belegt werden, daß die beim Seilkernverfahren erbohrten "Cuttings" überwiegend als Nachfall anzusprechen sind. Im Bereich 1166 - 1176 m wurde ein "Nachschleppen" des Minerals Quarz in den Zentrifugenproben festgestellt. Die Ursache dafür liegt in einer erhöhten Pumprate während dem Bohren mit Rollenmeißeln, so daß, bei der jetzigen Auslegung der Zentrifuge, nicht mehr die gesamte Spülmengmenge von den Feststoffen gereinigt werden kann.

Anhand der durch die chemisch-analytische Untersuchung der Bohrspülung erzielten Daten, konnten keine Zuflußhorizonte von frei migrierenden Wässern nachgewiesen werden.

Am ICP-AES wurde die Dekreptionsanalytik aufgenommen, um die Zusammensetzung von Fluideinschlüssen in Quarzen zu bestimmen. Die Einschlußuntersuchungen zeigen, daß Na das vorherrschende Kation der "fluid inclusions" ist.

Durch die Installierung eines Quirlentgasers in der Spülungsrinne konnte erstmals eine kontinuierliche Untersuchung der in der Spülung gelösten Gase durchgeführt werden. Deutlich graphitführende Horizonte zeichnen sich durch signifikant höhere CH_4 - und He-Gehalte aus. Das Redoxverhalten der Bohrspülung korreliert mit den O_2 - und H_2 -Gehalten der Spülung, wobei Wasserstoff durch den Bohrprozeß gebildet wird (artifi-

ziell). Die Menge des gebildeten Wasserstoffs ist von dem verwendeten Werkzeug abhängig und beträgt beim Bohren mit Diamantbohrkronen bis 2 %. Der pH-Wert der Bohrspülung kontrolliert die CO₂-Gehalte in der freigesetzten Gasphase.

Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen lassen sich durchteufte Störungzonen durch folgende Parameter charakterisieren : Cl, He, Schwefel, Chlorit und Sulfiderze (insbesondere Pyrit und Zinkblende).

C.7 Schriftenverzeichnis

- HEINRICHS, H., KÖNIG, N., SCHULTZ, R. (1985): Atom-Absorptions- und Emissionsspektroskopische Bestimmungsmethoden für Haupt- und Spurenelemente in Probelösungen aus Waldökosystem-Untersuchungen. Im Selbstverlag des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben der Universität Göttingen.
- HEINSCHILD, H.-J., HOMANN, K.D., STROH, A., TAPFER, M. (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB - Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992 m: KTB Report, 88-2: C1 - C107, Hannover.
- HOLLOWAY, J.R. (1981): Fugacity and activity of molecular species in supercritical fluids. In: Fraser, D.G., Ed., Thermodynamics in Geology, 161-181
- RANKIN, A.H., ALDERTON, D.H.M., THOMPSON, M. and GOULTER (1982): Determination of uranium: carbon ratios in fluid inclusion decrepitates by inductively coupled plasma emission spectroscopy. Min. Mag., Vol. 46, 179-186
- SCHRADER, W., GROBENSKI, Z. und SCHULZE, H. (1981): Einführung in die AES mit dem induktiv gekoppelten Plasma (ICP). Angewandte Atom-Spektroskopie, Heft 28
- THOMPSON, M., RANKIN, A.H., WALTON, S.J., HALLS, C. and FOO, B.N. (1980): The analysis of fluid inclusion decrepitate by inductively-coupled plasma atomic emission spectroscopy an exploratory study. Chem. Geol., 30: 121-133
- WINGE, R.K., FASSEL, V.A., PETERSON, V.J. and FLOYD, M.A. (1985): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, An Atlas of Spectral Information. Physical Sciences Data 20.

C.8 Danksagung

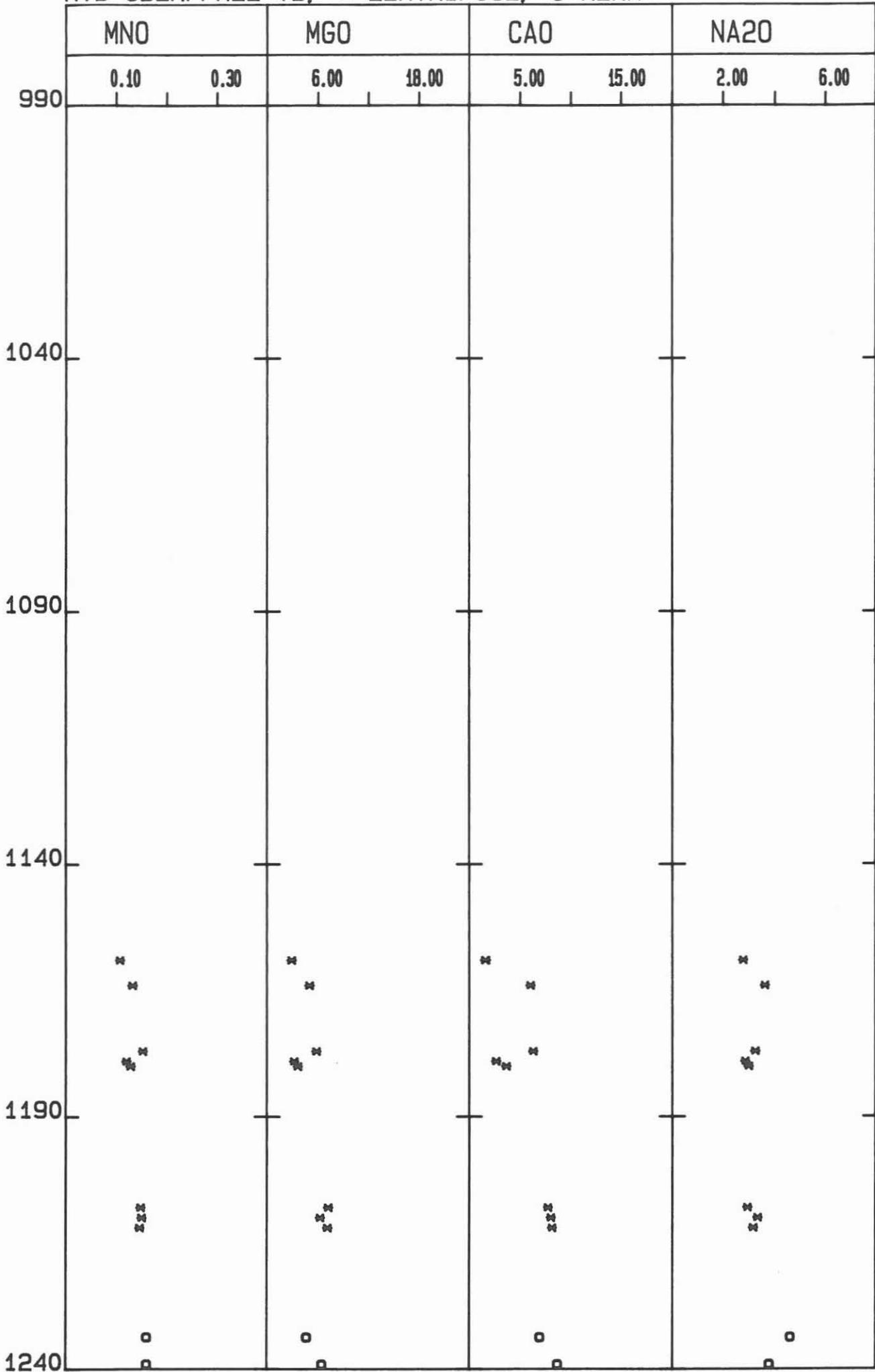
Die Schmelztabletten zur Bestimmung der chemischen Gesteinszusammensetzung wurden im Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung in Gießen hergestellt und dort auch gemessen. Unser Dank gilt dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr. Emmermann und seinen Mitarbeitern, insbesondere Frau M. Grünhäuser für die Durchführung der Messungen und Frau N. Hüttel, Frau A. Harjung sowie Herrn F. Naujoks für die Probenpräparation. Unser weiterer Dank gilt den technischen Mitarbeitern der Geochemiegruppe im Feldlabor, Herrn Kamm, Herrn Lippert, Frau Weber und Herrn Welker. Herrn Dr. Erzinger danken wir für die Durchführung des Umzuges des Massenspektrometers von Gießen nach Windischeschenbach sowie zahlreiche praktische Hinweise bei aufgetretenen Problemen. Die Programmeinweisung wurde von Herrn Samel aus Gießen durchgeführt, dem unser herzlicher Dank gebührt. Herrn Dr. A.H. Rankin danken wir für die Einführung in die Methode der ICP-Dekrepiationsanalytik. Weiterhin danken wir Herrn Prof. Dr. Emmermann und Herrn Dr. Lauterjung für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Die Textverarbeitung wurde überwiegend an Rechnersystemen der AG Geophysik durchgeführt, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

C.9 Anhang

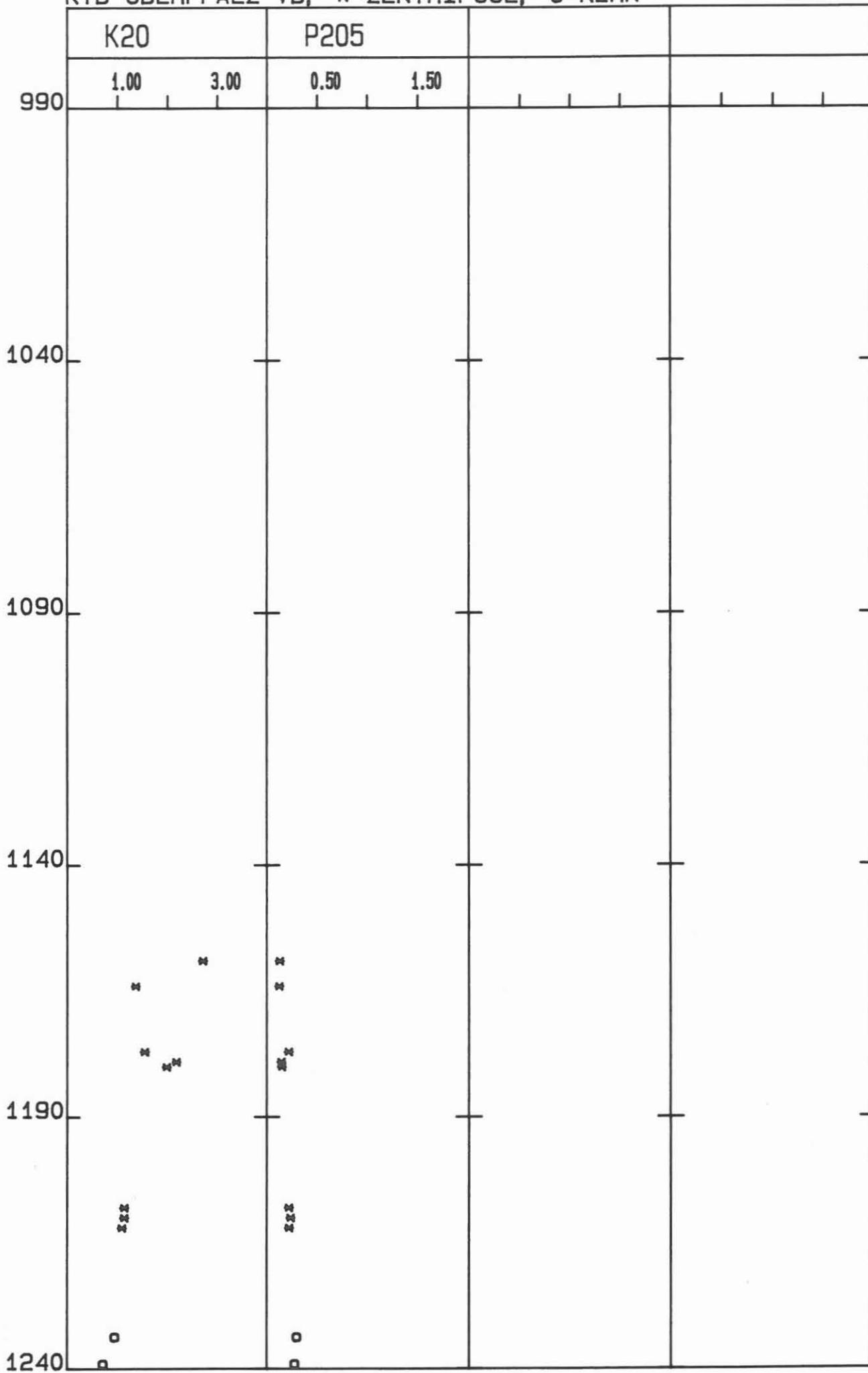
- C.9.1 Tiefenlogs der RFA-Analysen
- C.9.2 Tiefenlogs der RDA-Analysen
- C.9.3 Tiefenlogs der Kationen- und Anionenanalysen
- C.9.4 Tiefenlogs der in der Bohrspülung gelösten Gase

C.9.1 Tiefenlogs der RFA-Analysen (1:1000)

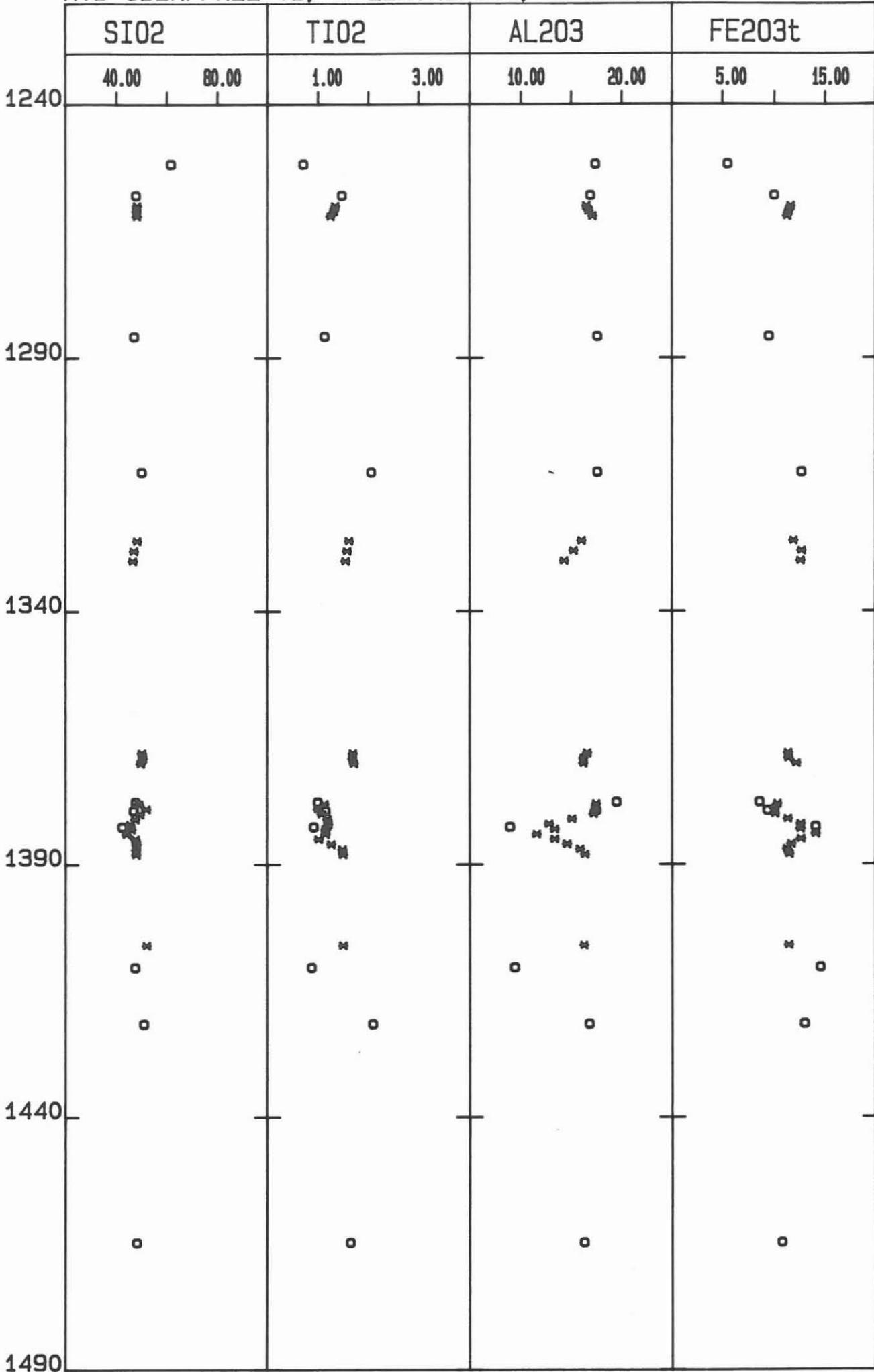
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE, O=KERN



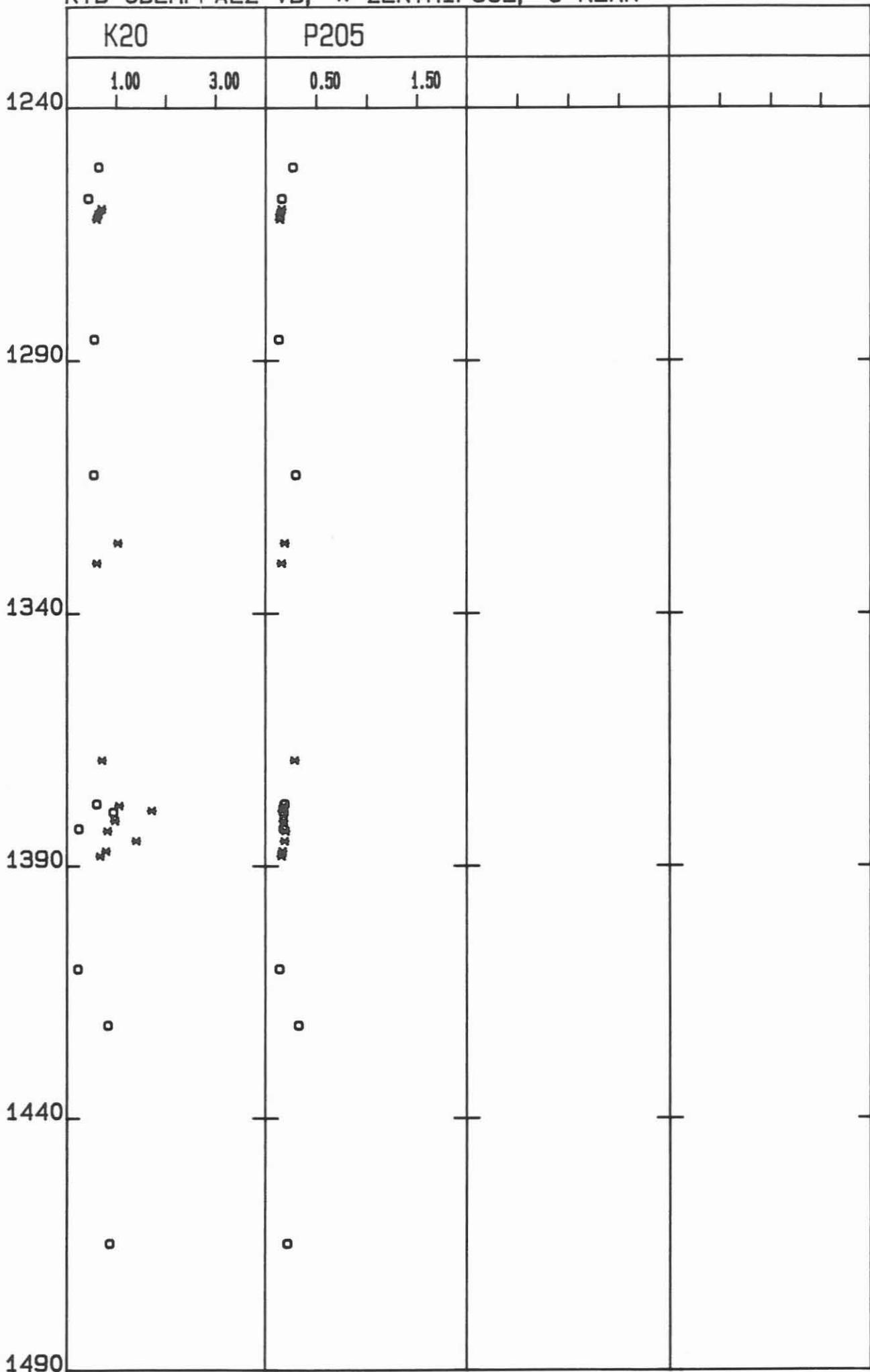
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE, O=KERN



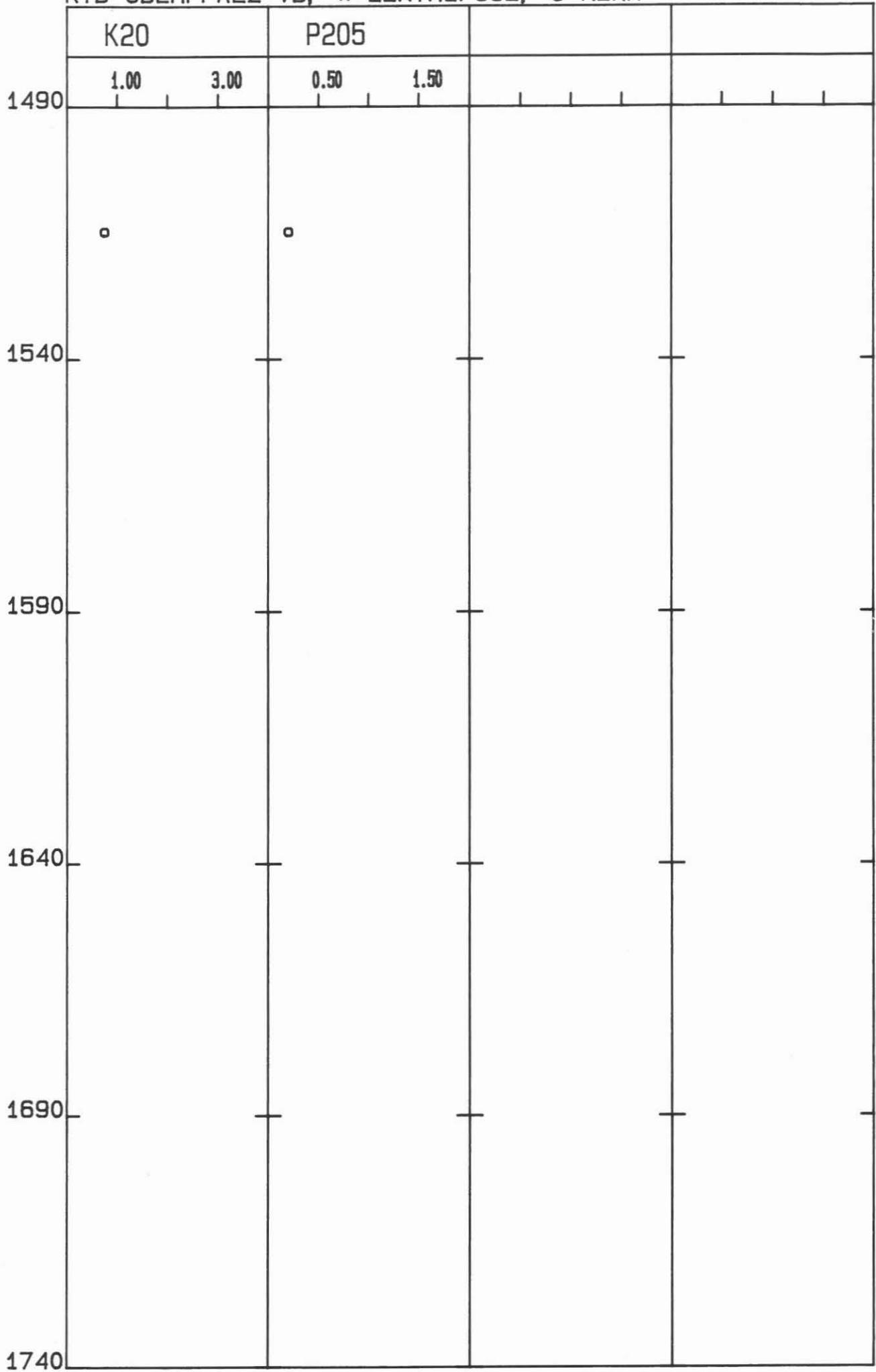
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE, O=KERN



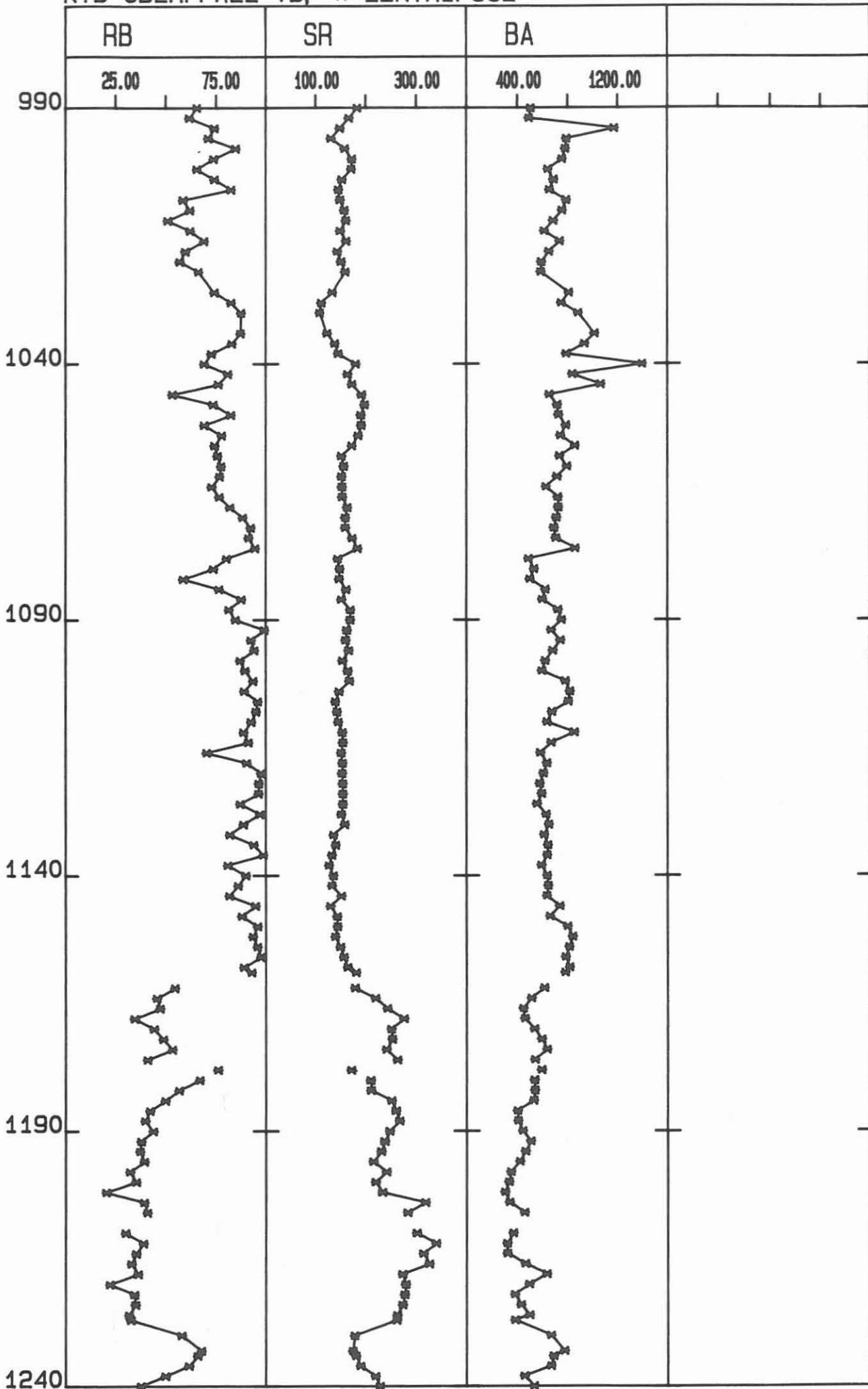
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE, O=KERN



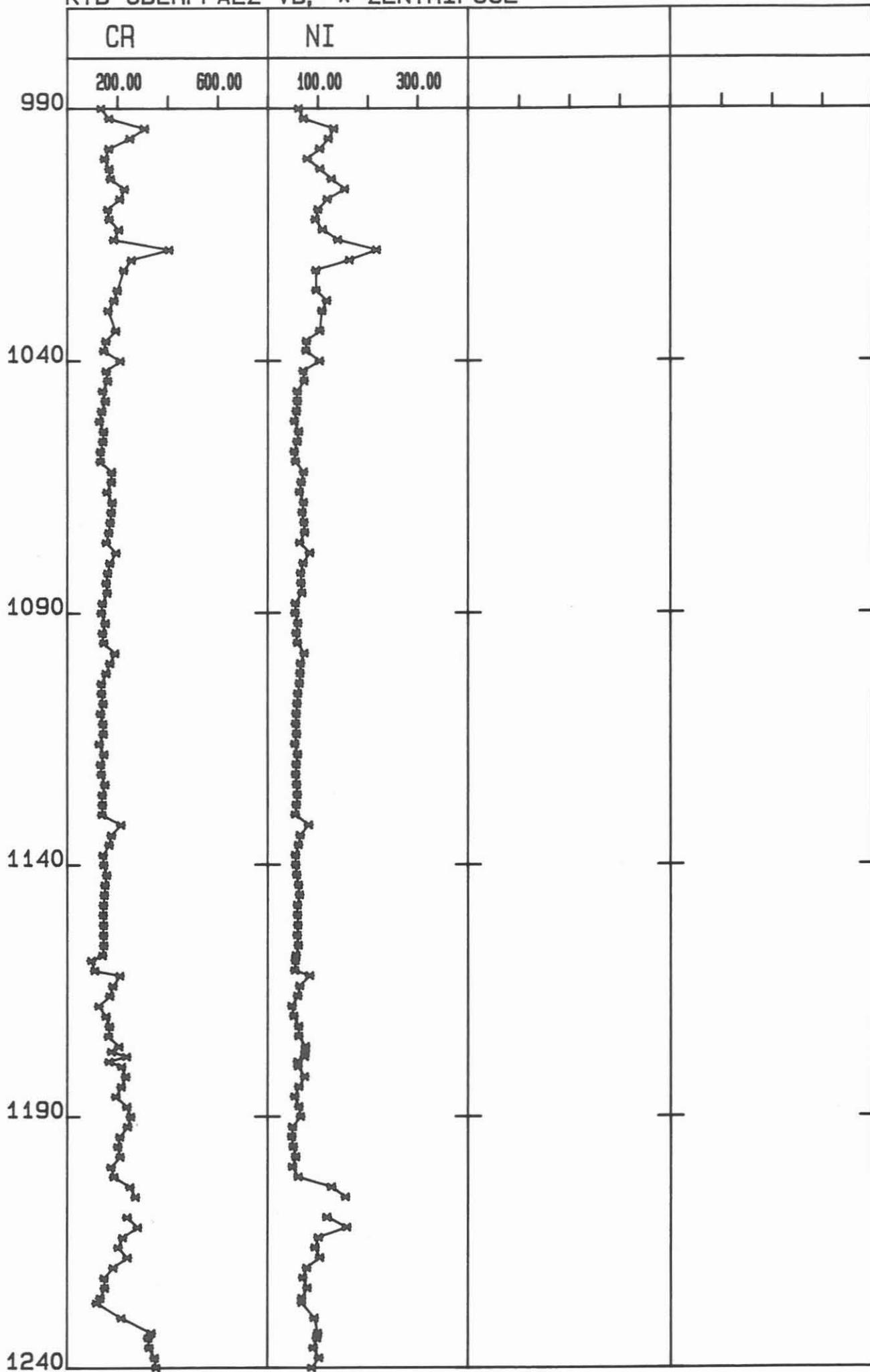
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE, O=KERN



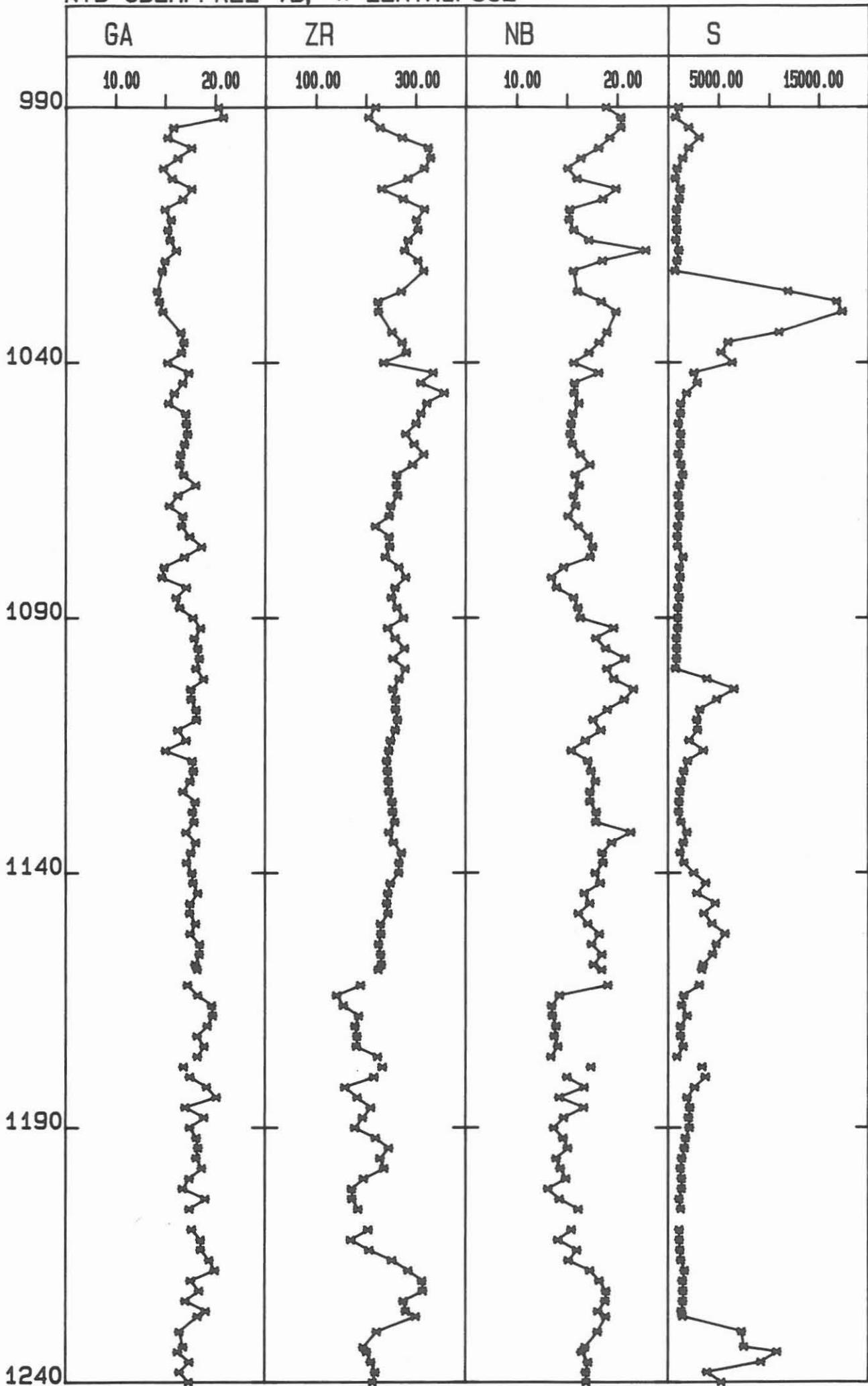
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



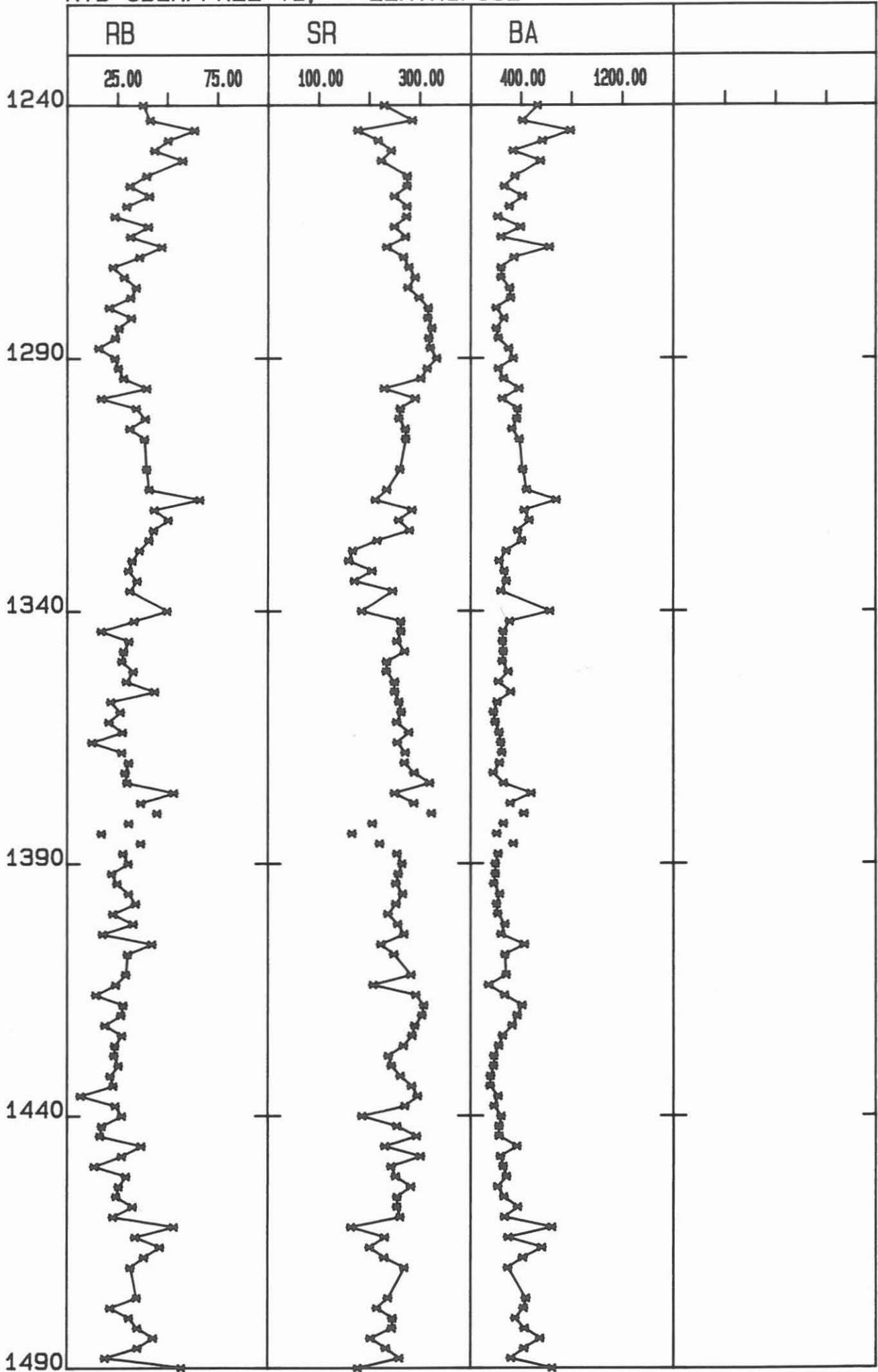
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



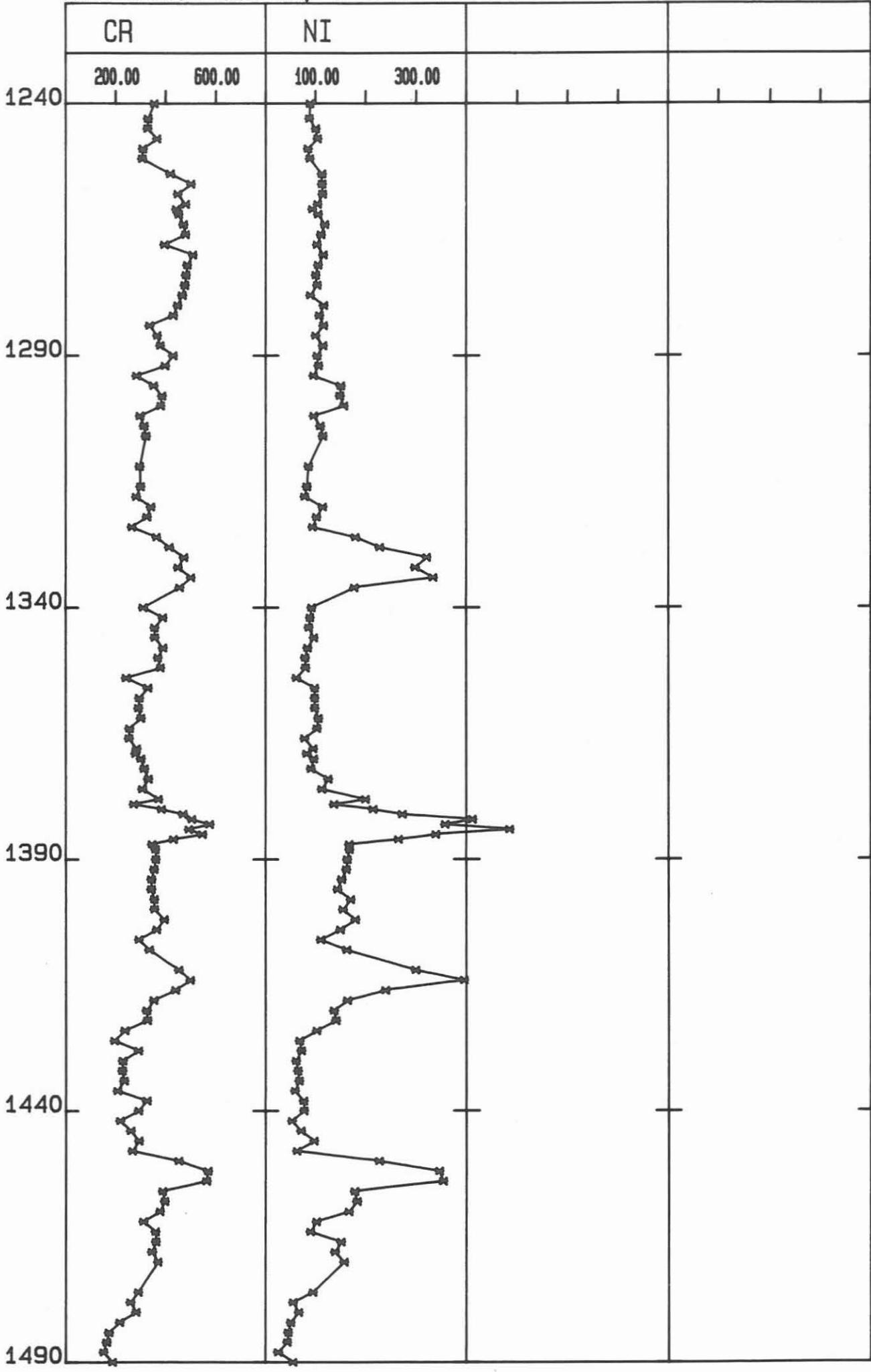
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



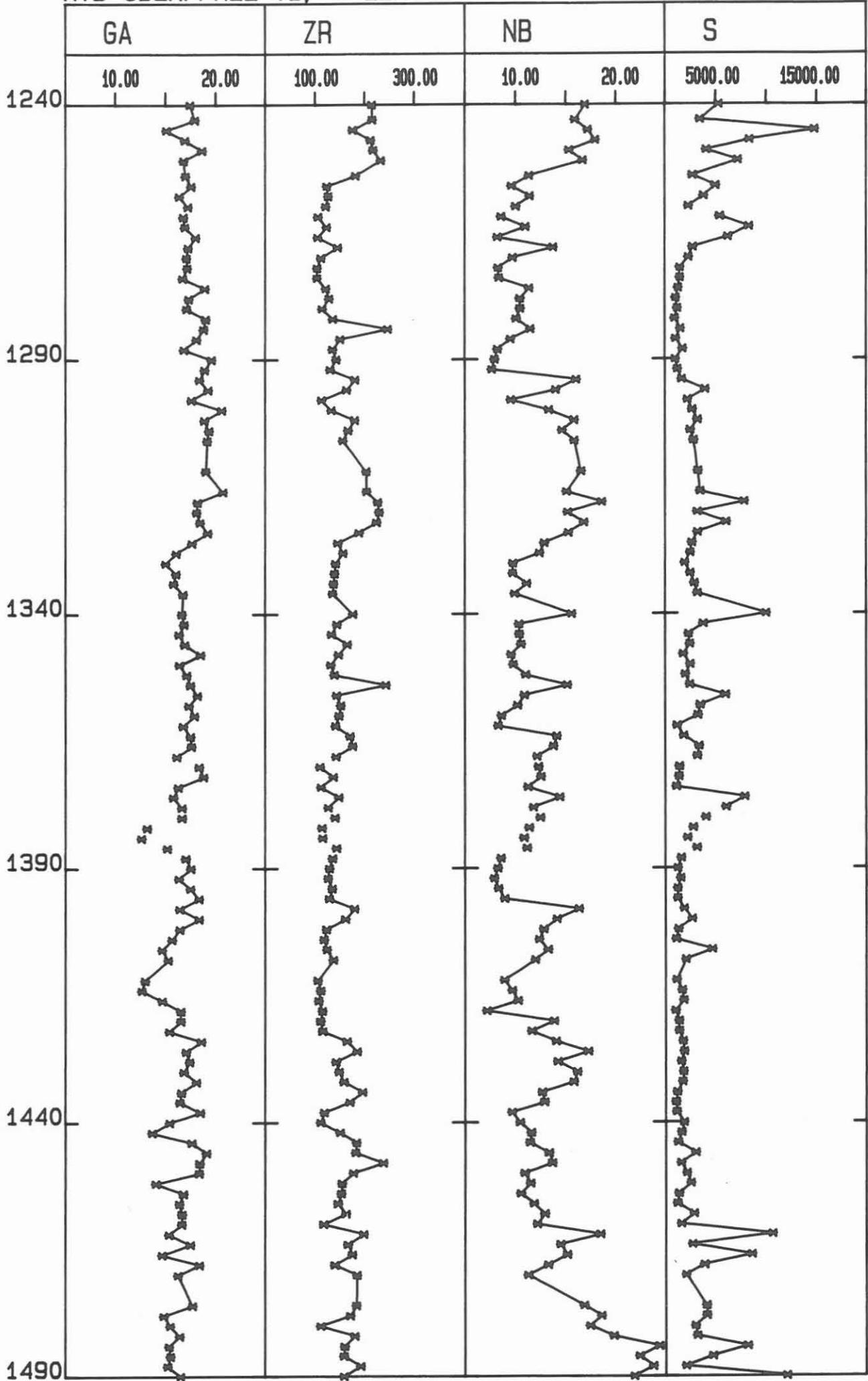
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



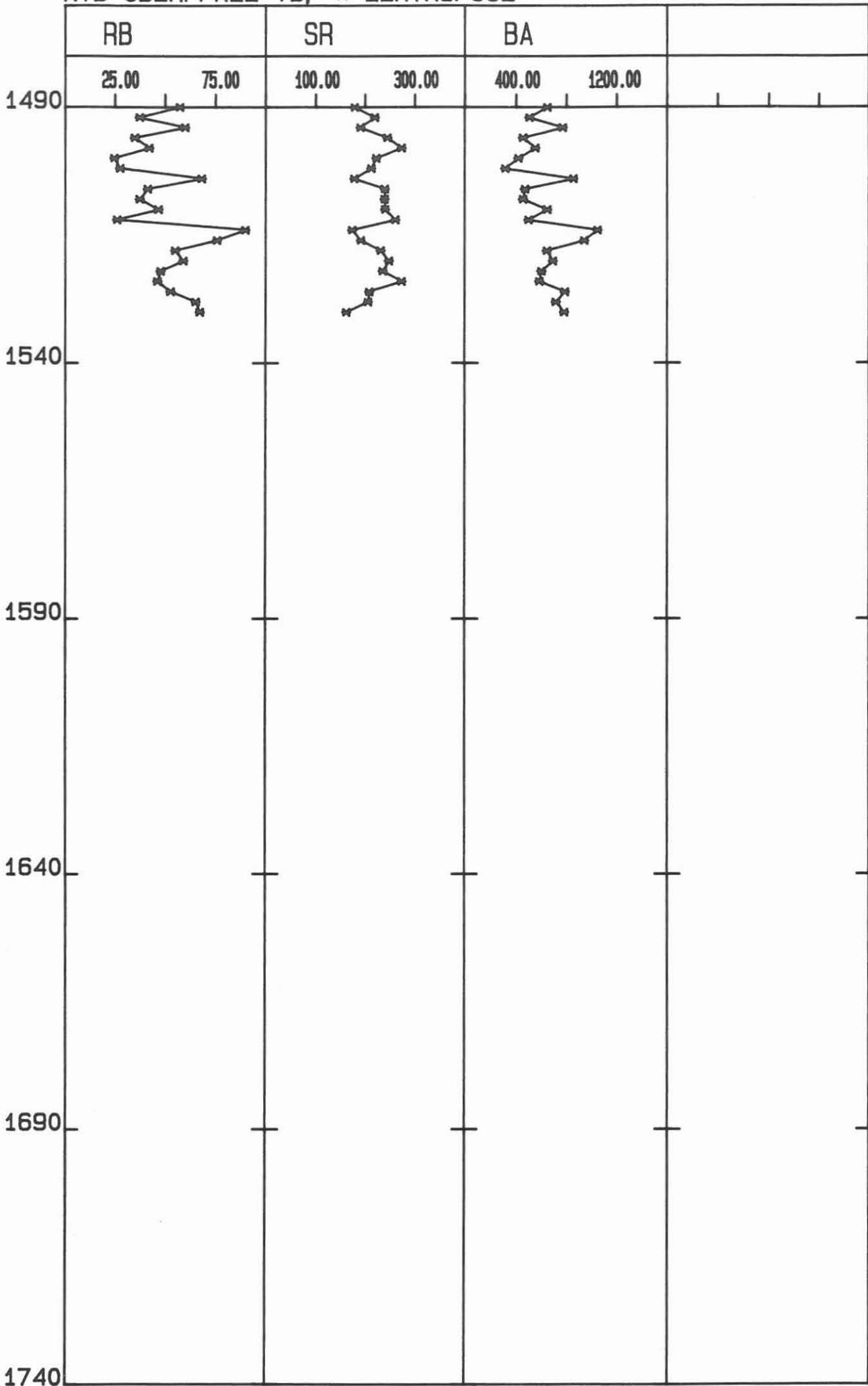
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



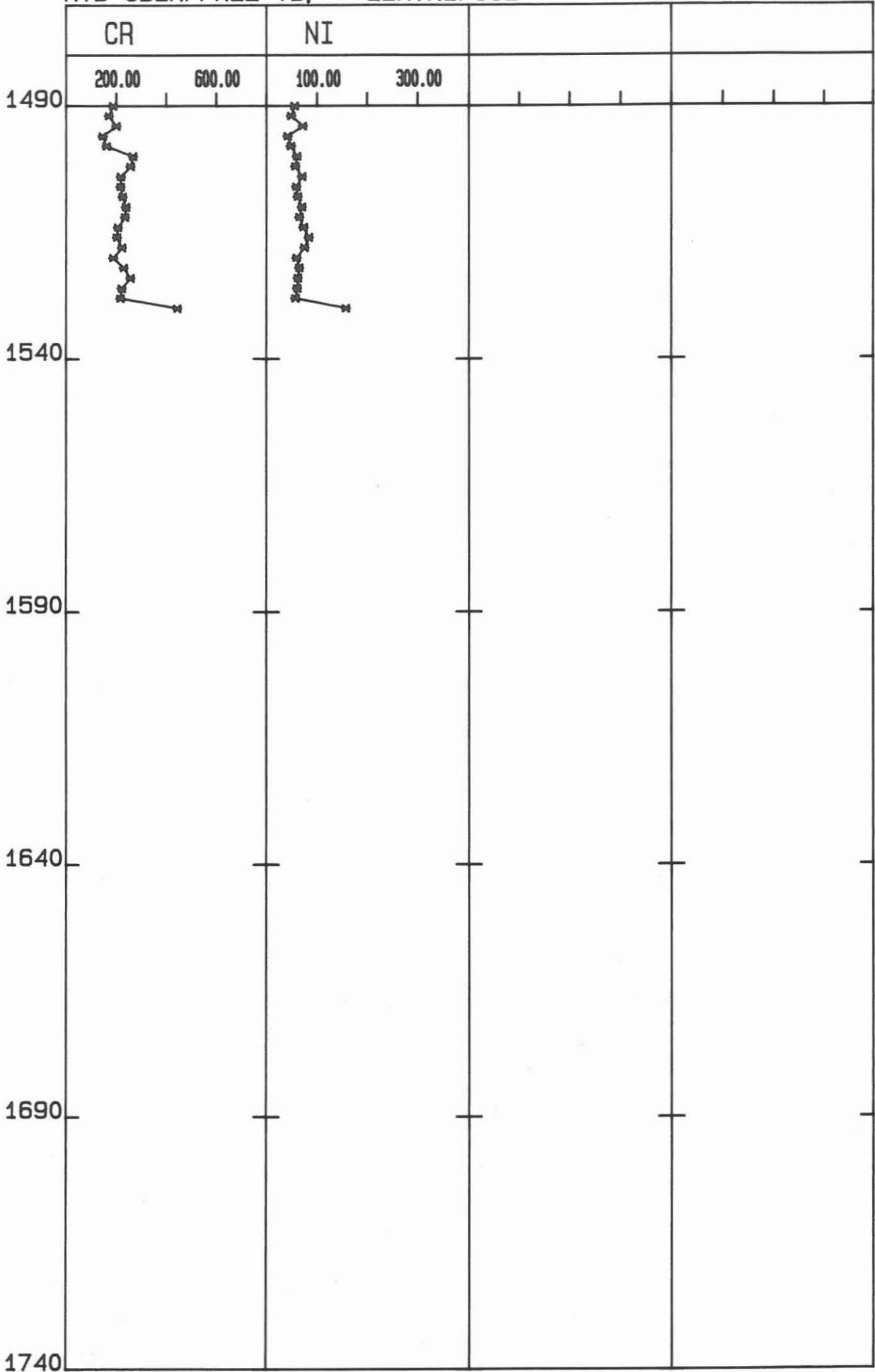
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



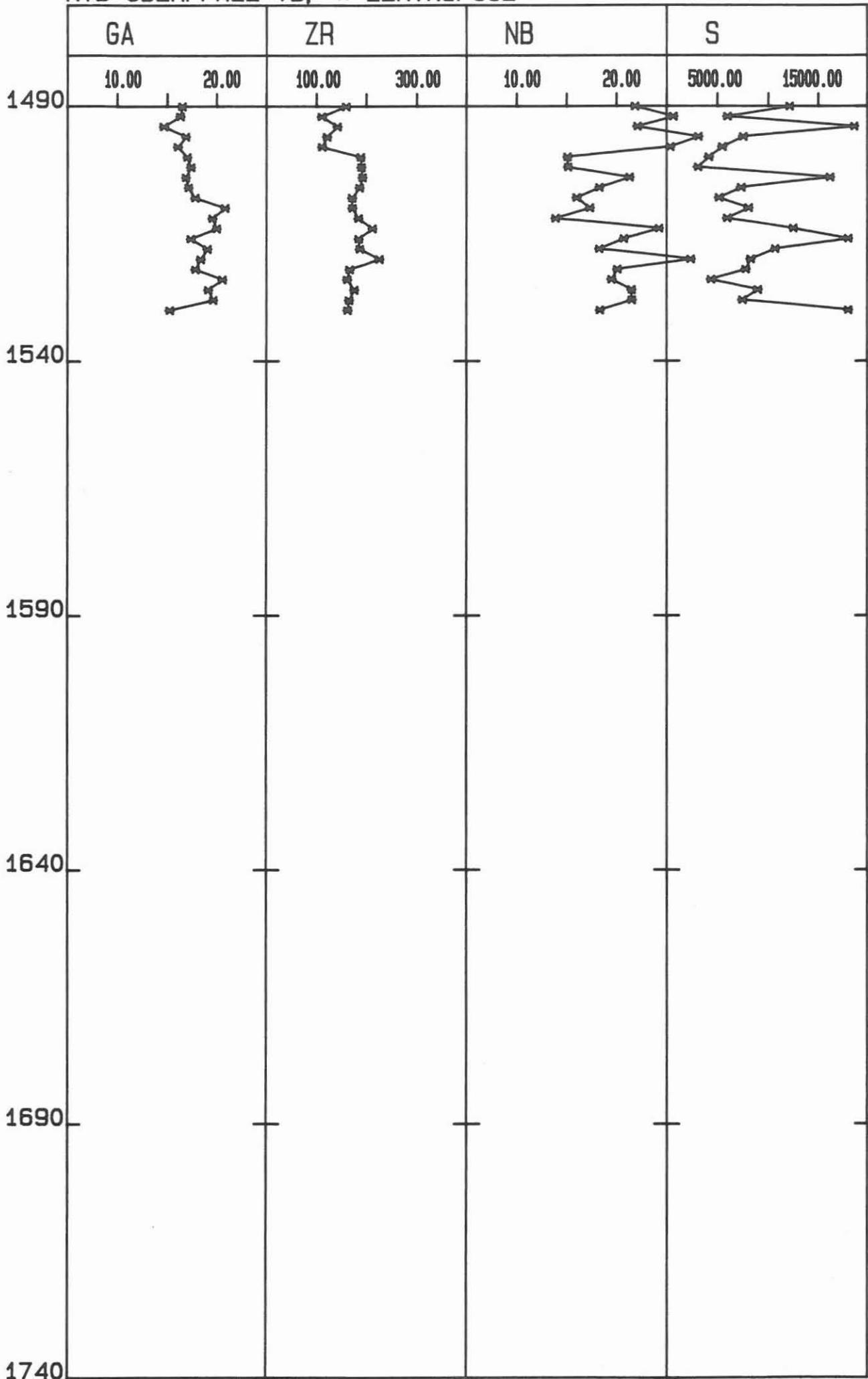
KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE



KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE

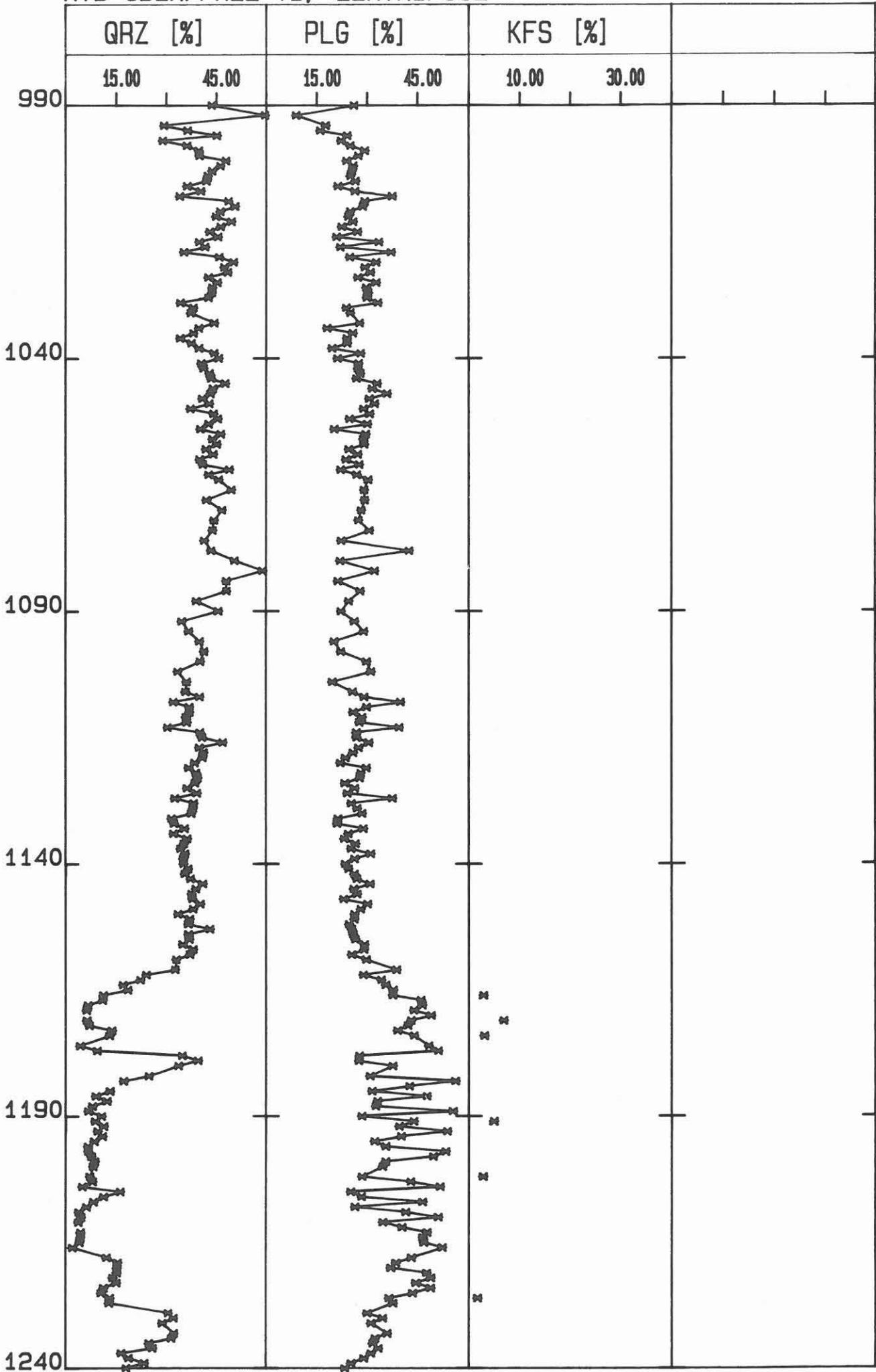


KTB OBERPFALZ VB, *=ZENTRIFUGE

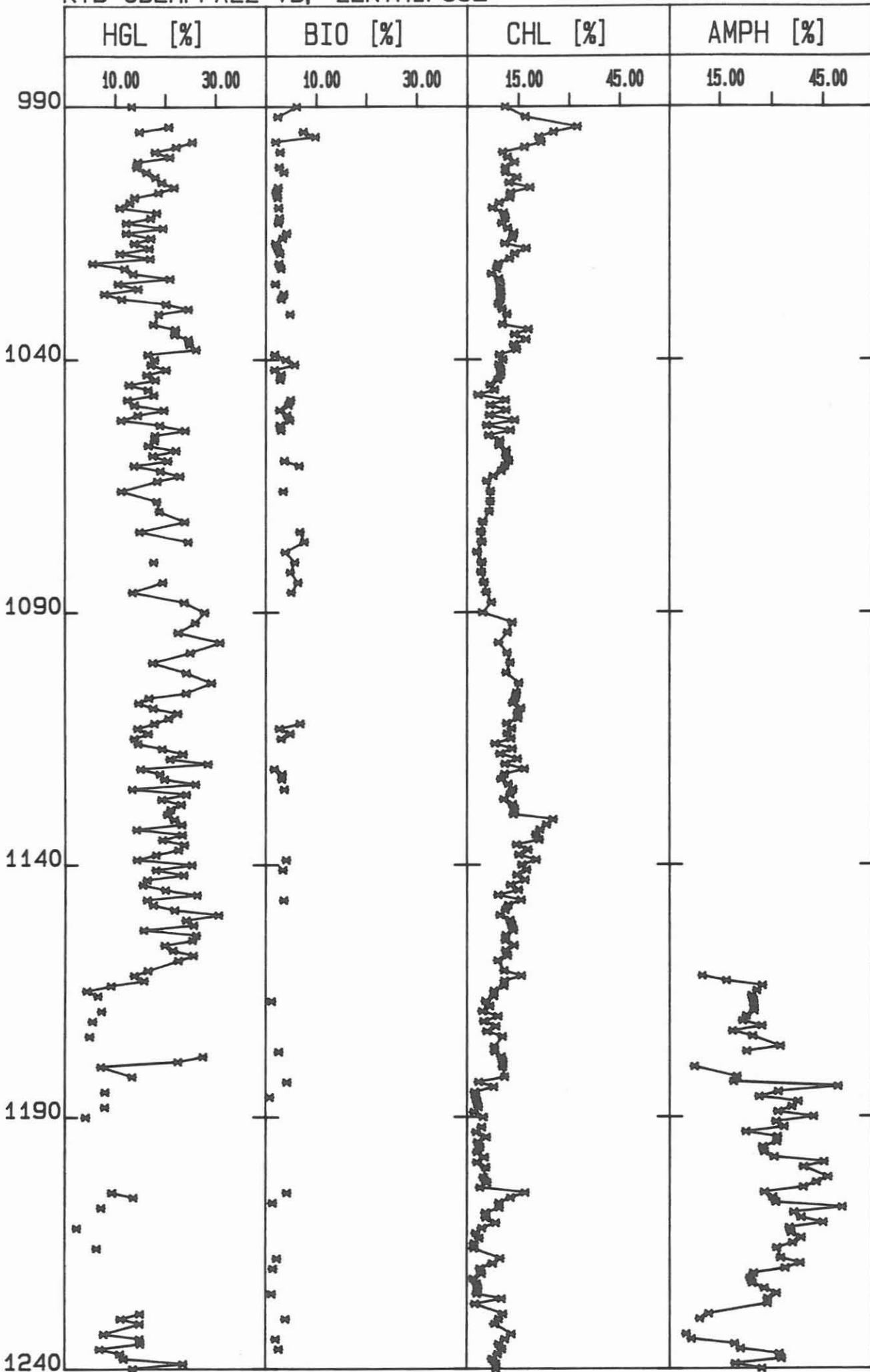


C.9.2 Tiefenlogs der RDA-Analysen (1:1000)

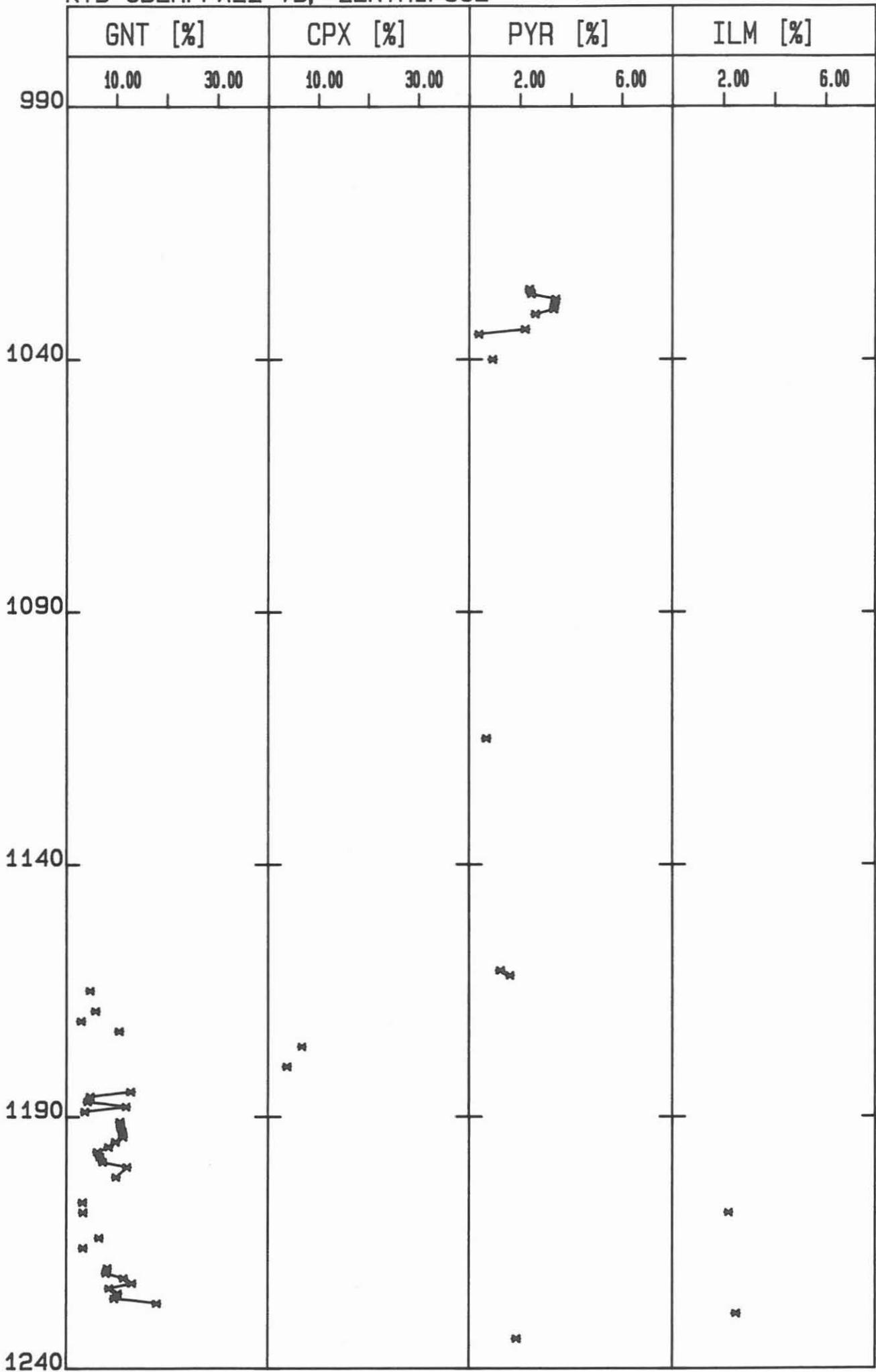
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



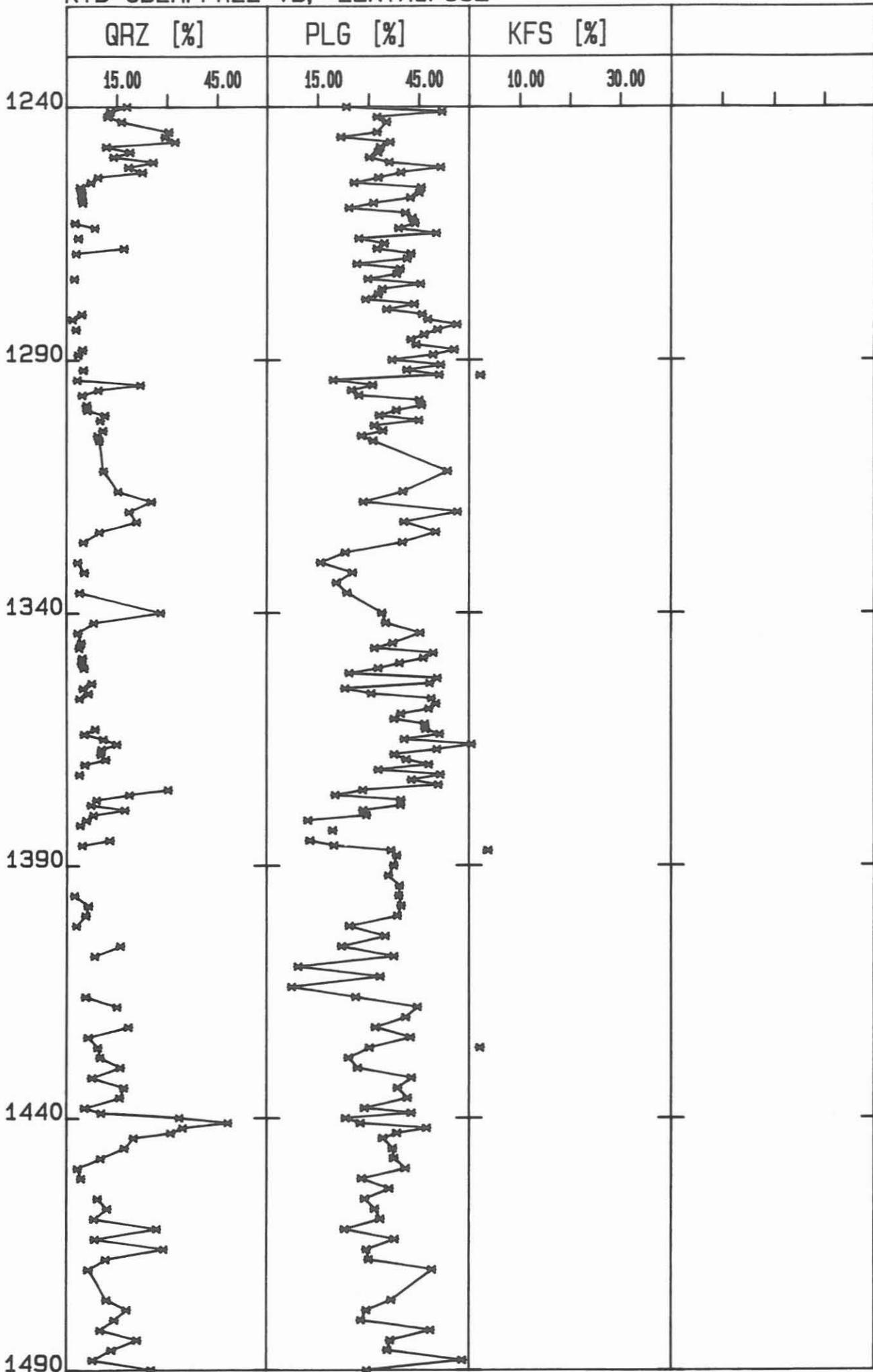
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



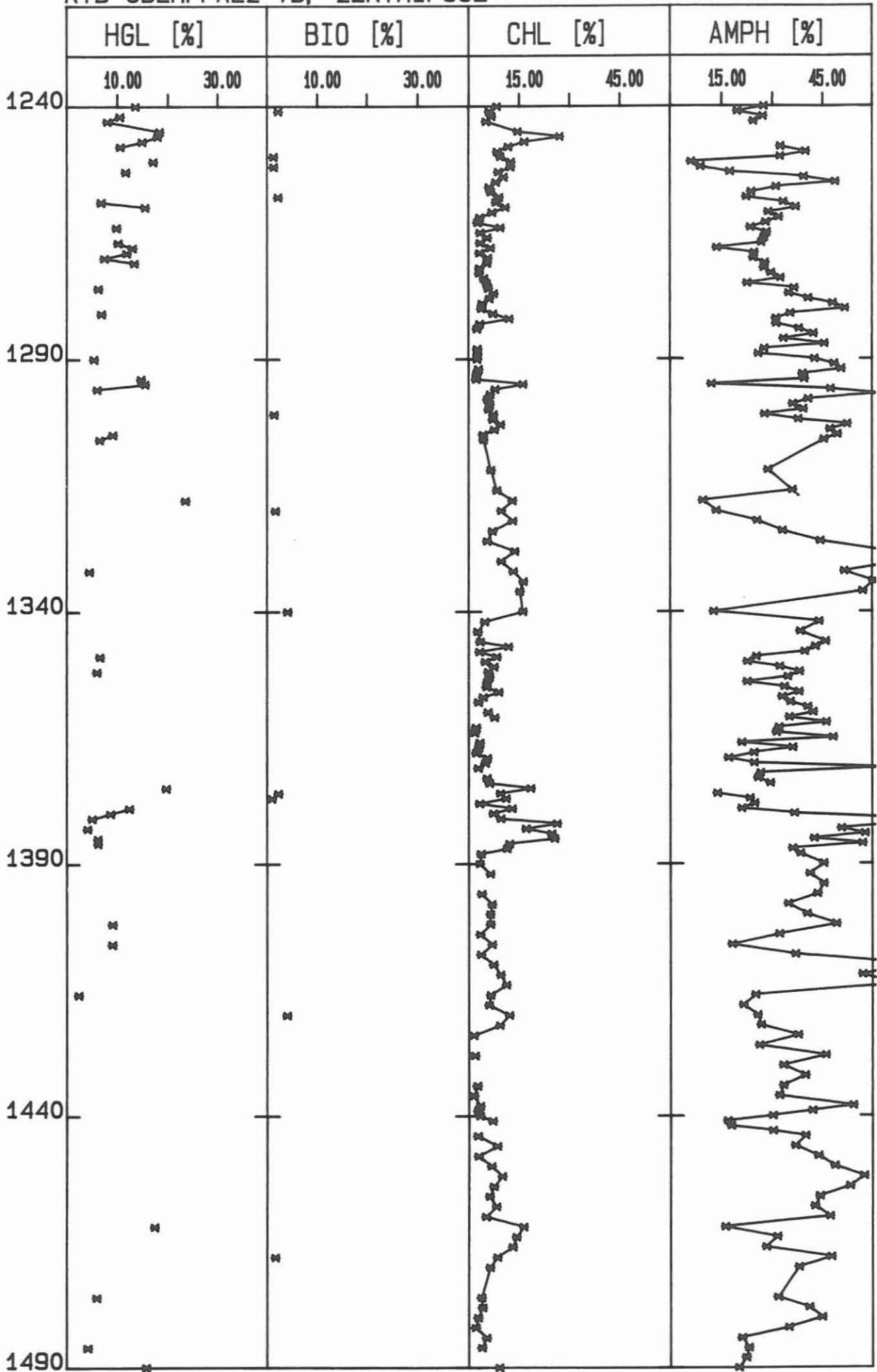
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



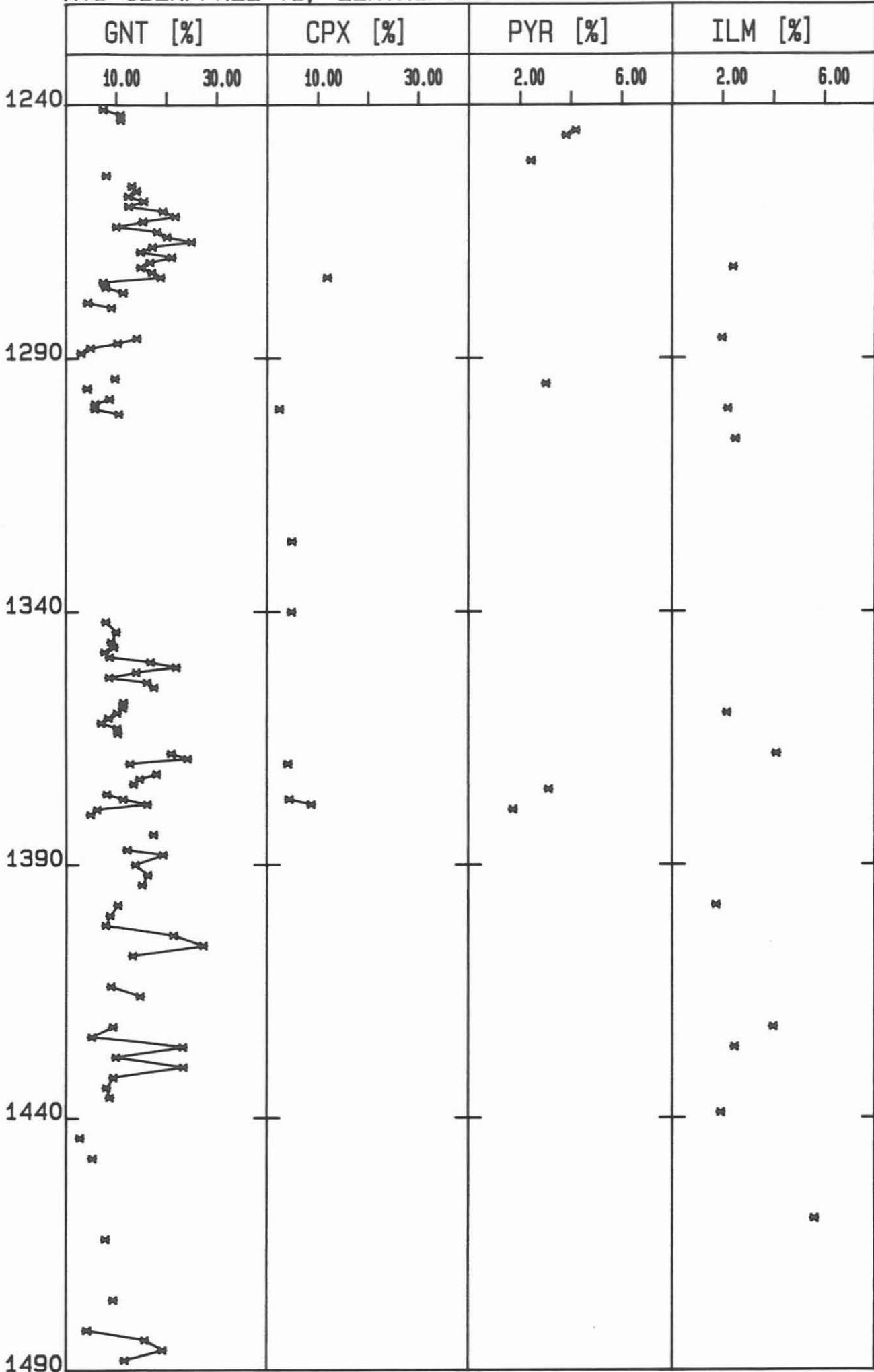
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



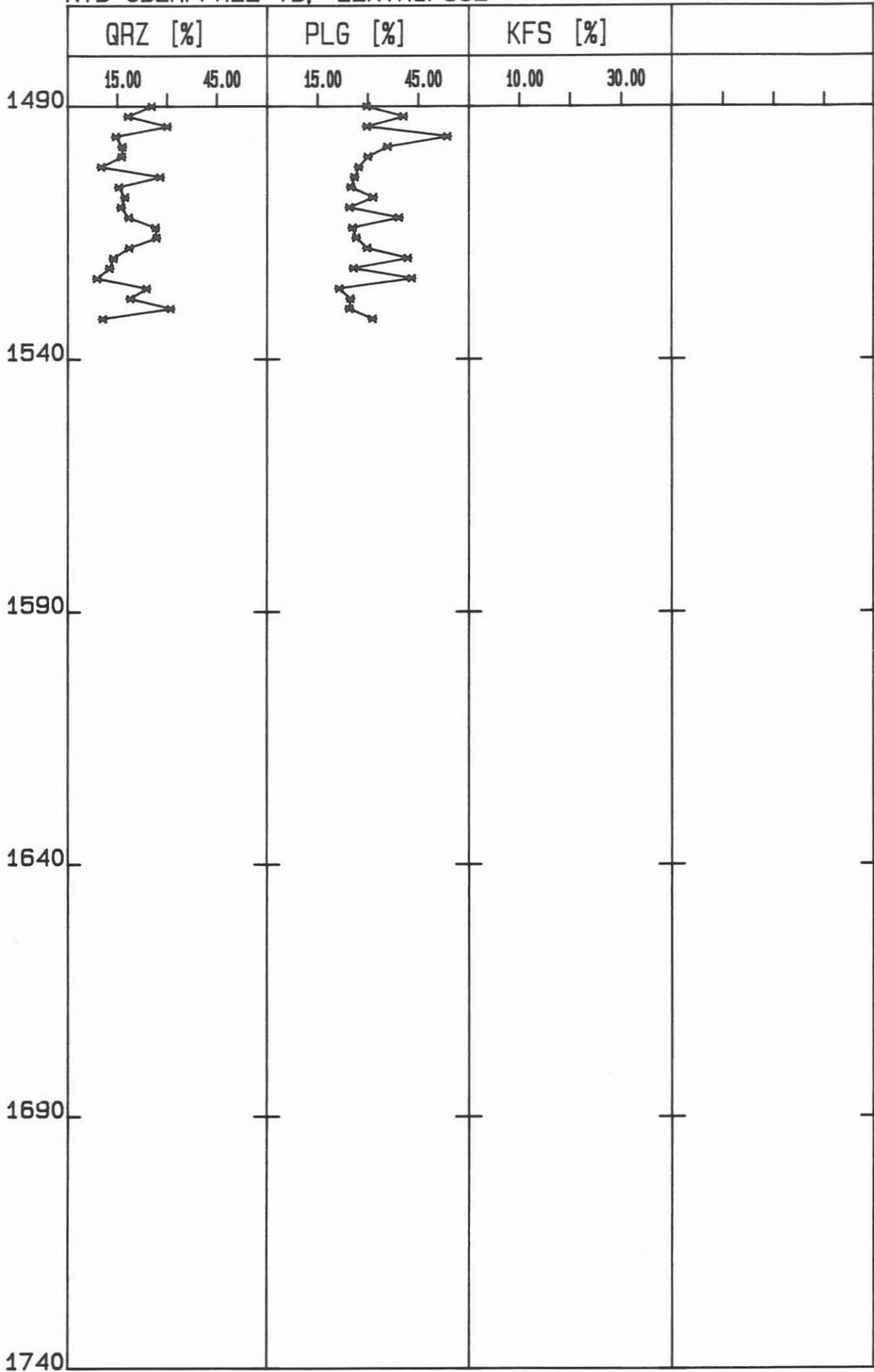
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



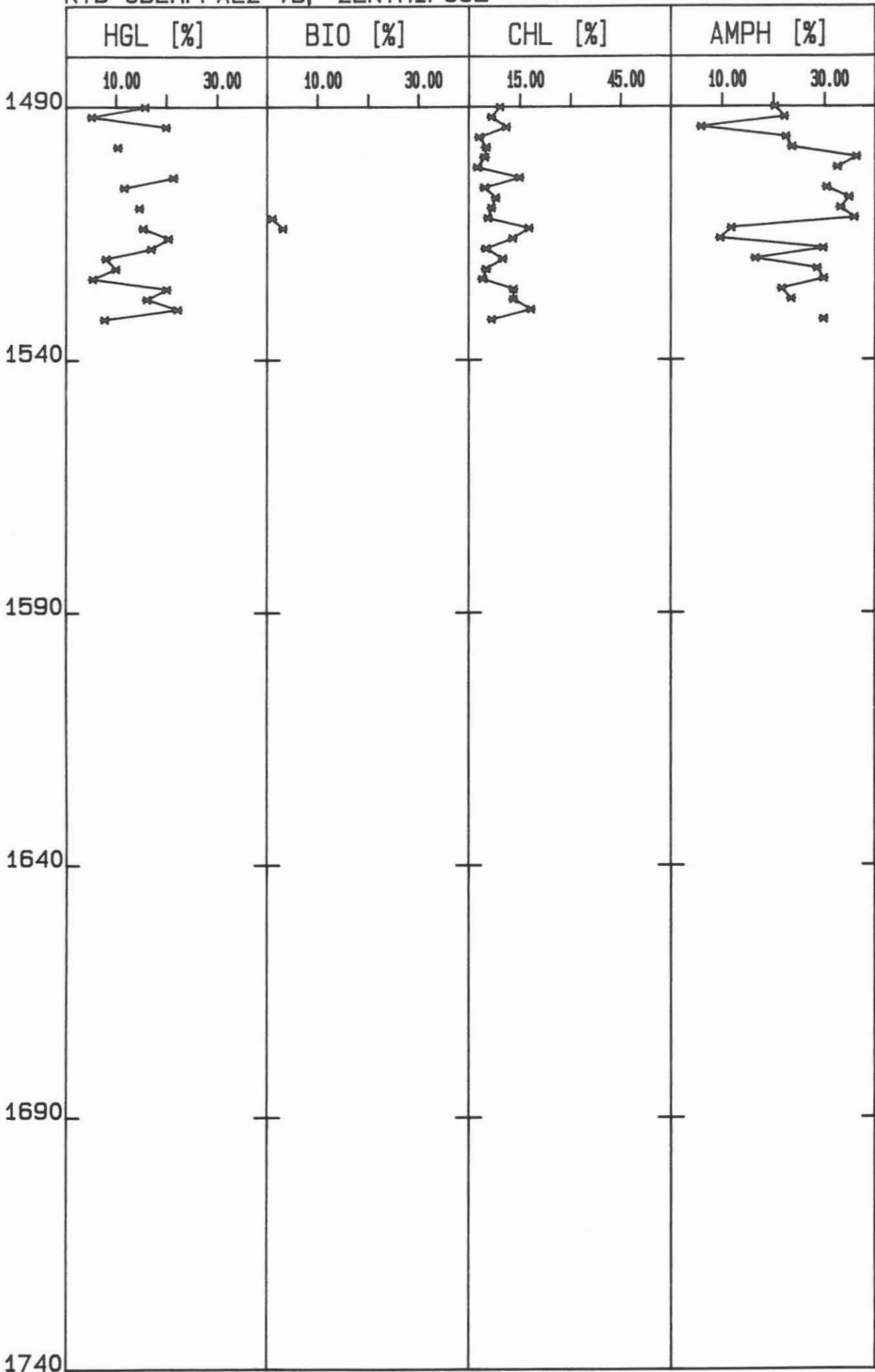
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



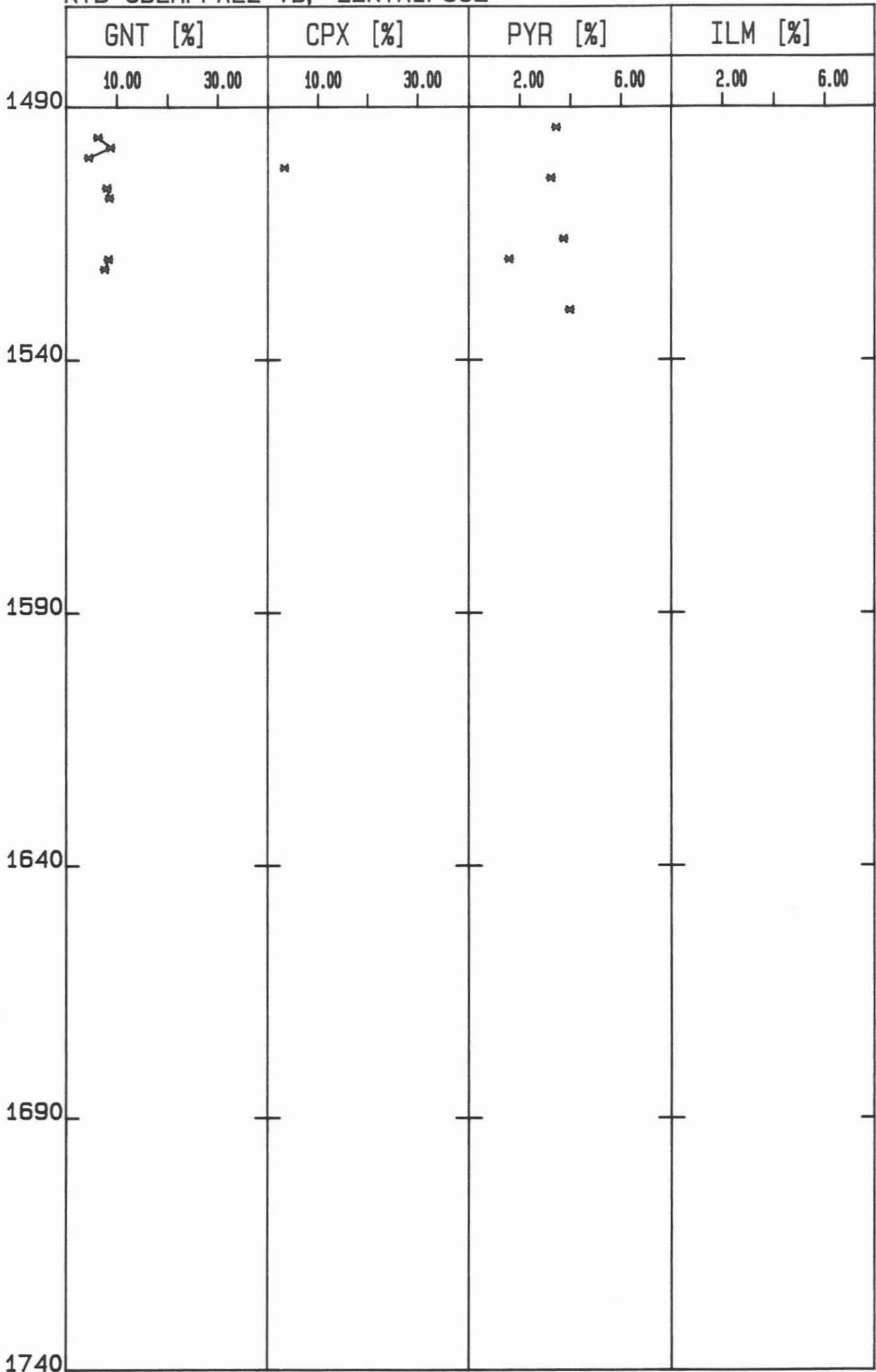
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



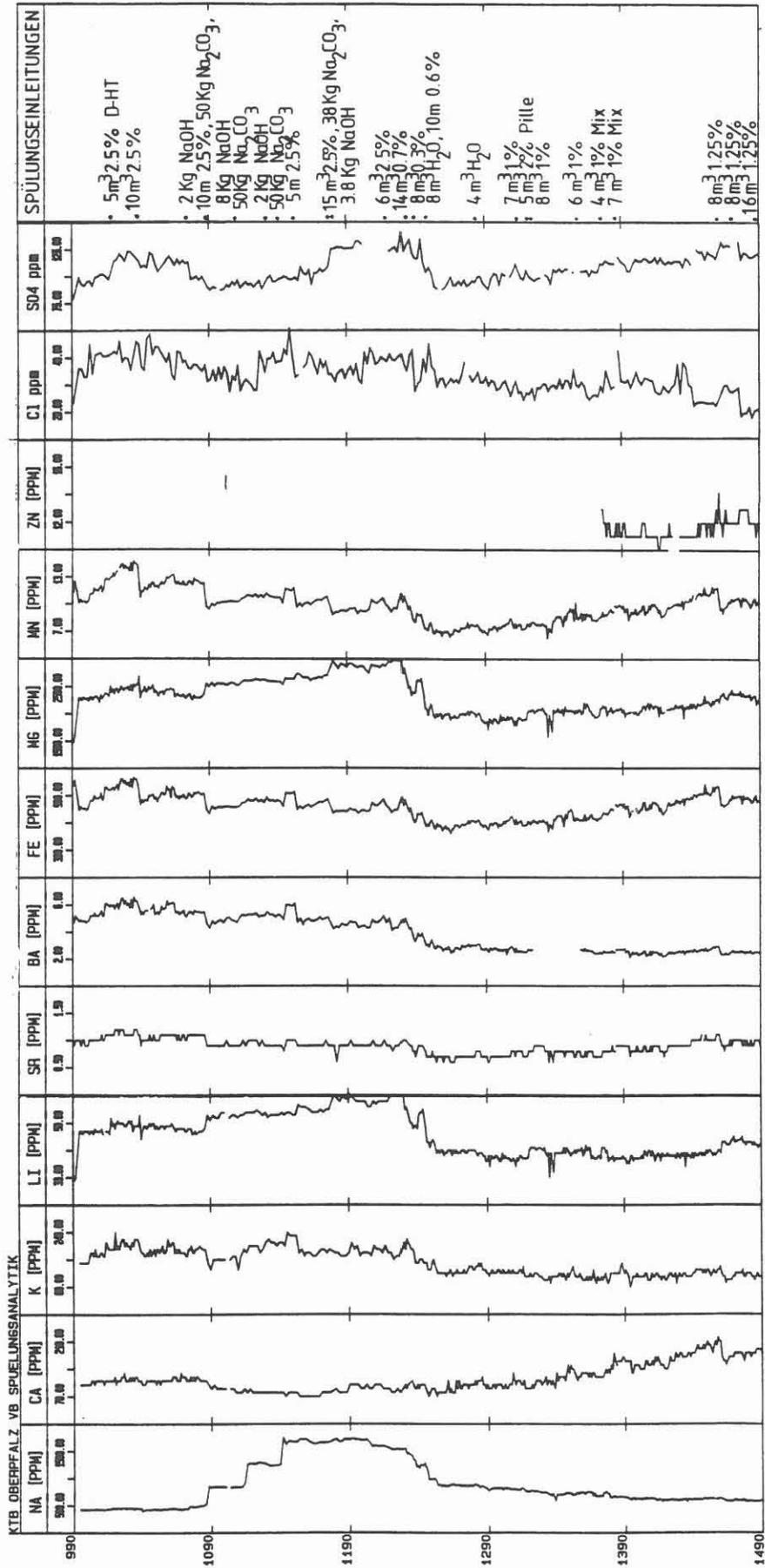
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



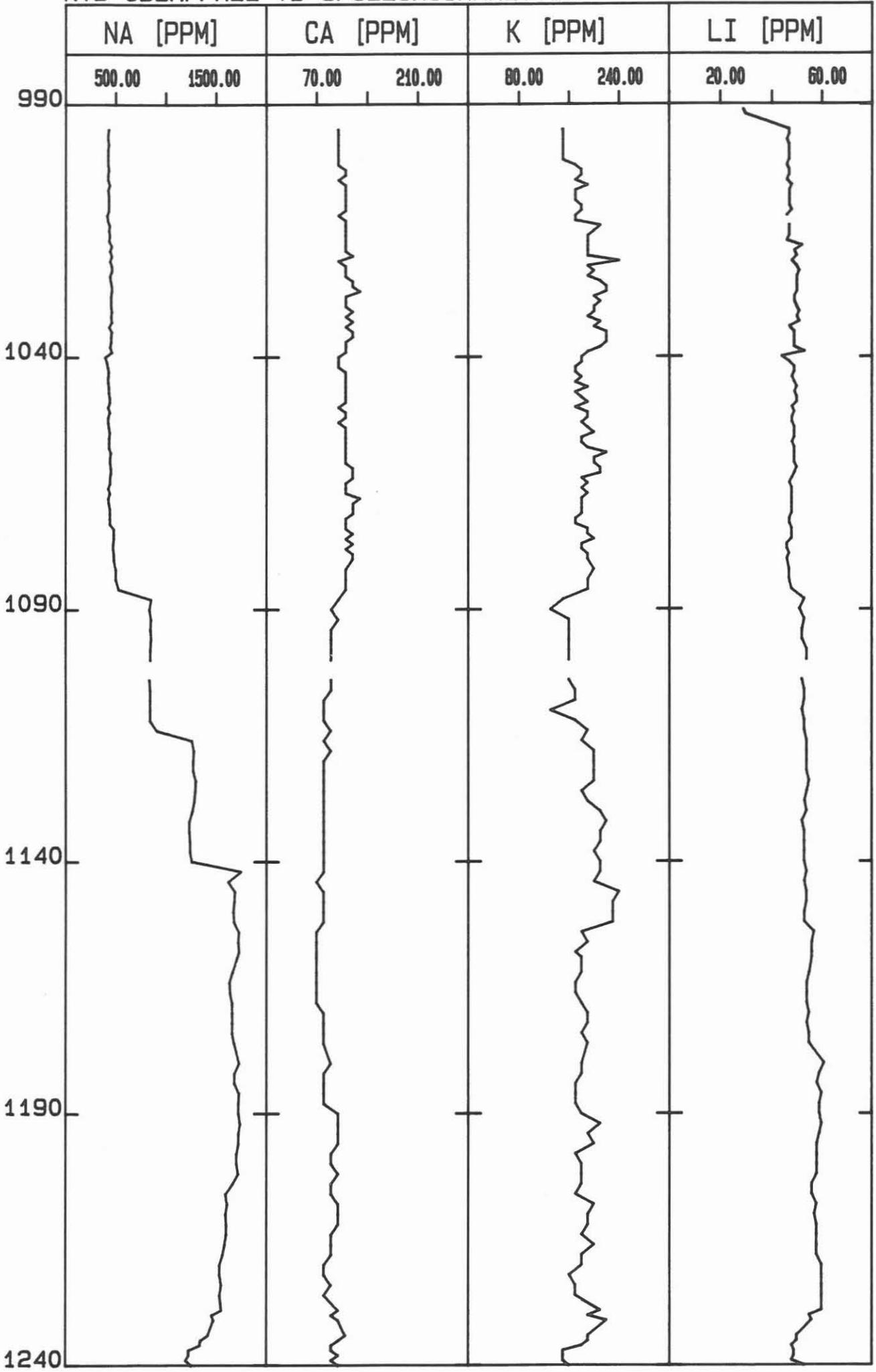
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



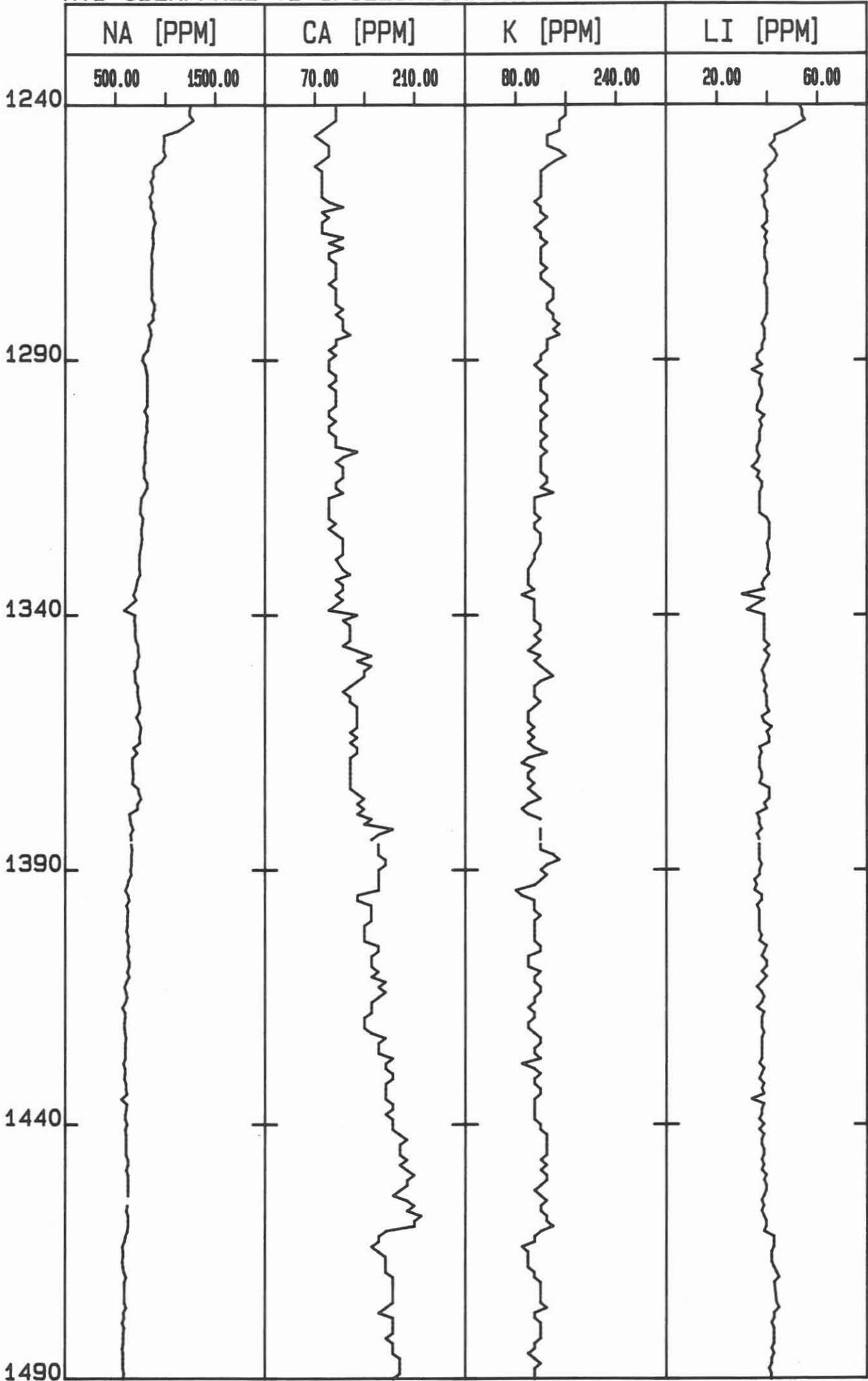
C.9.3 Tiefenlogs der Kationen- und Anionenanalyse (1:1000)



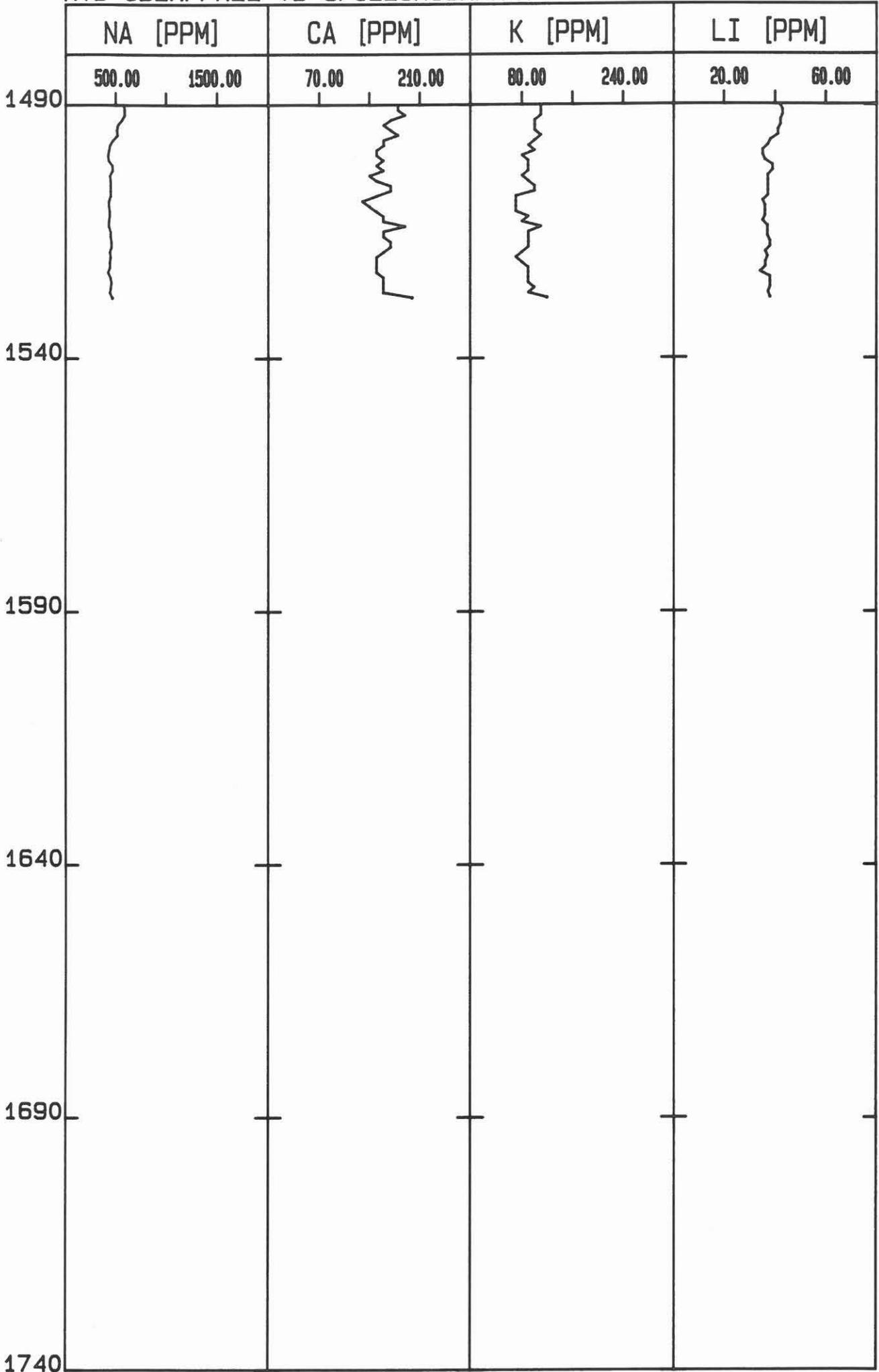
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



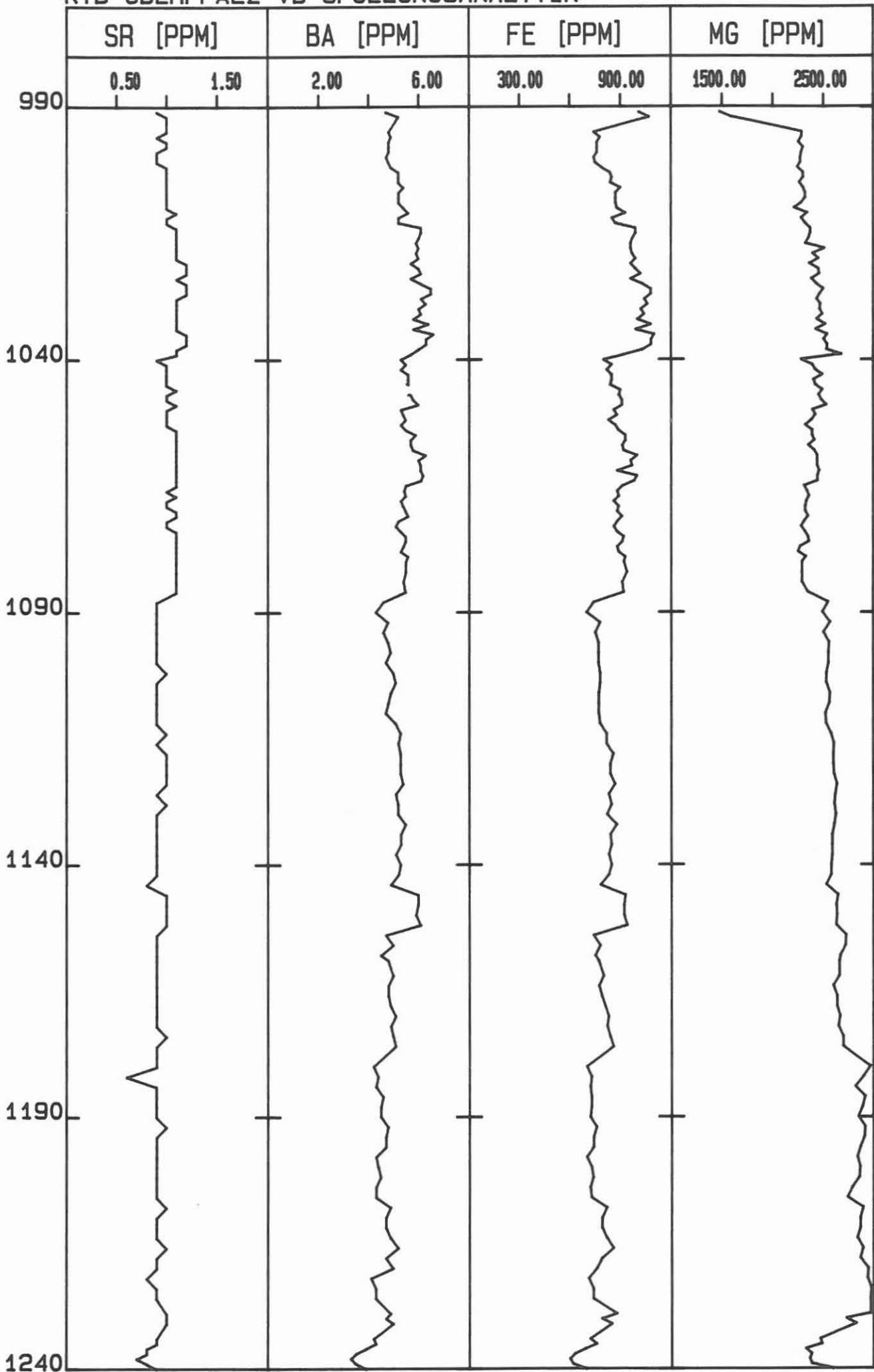
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



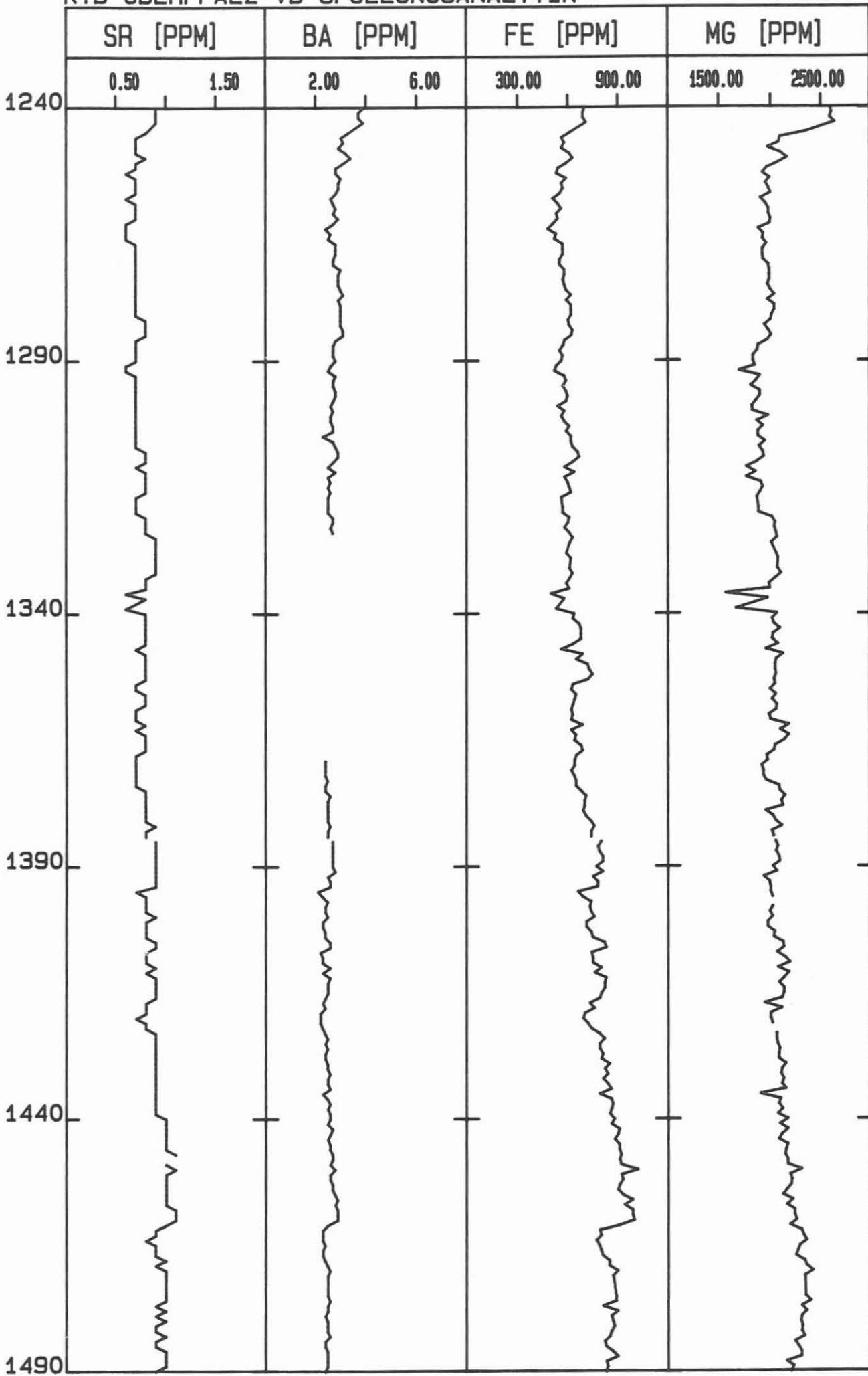
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



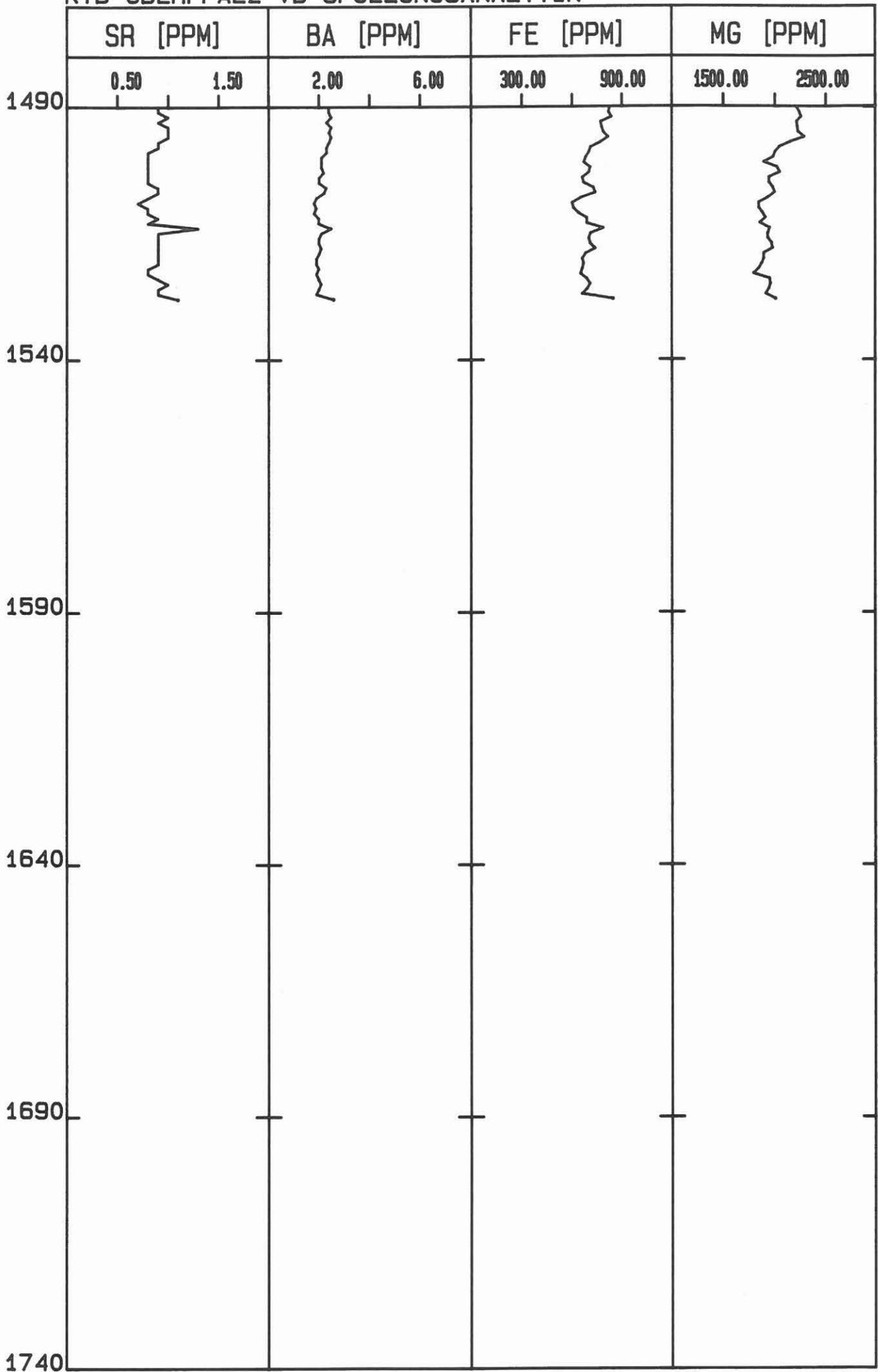
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



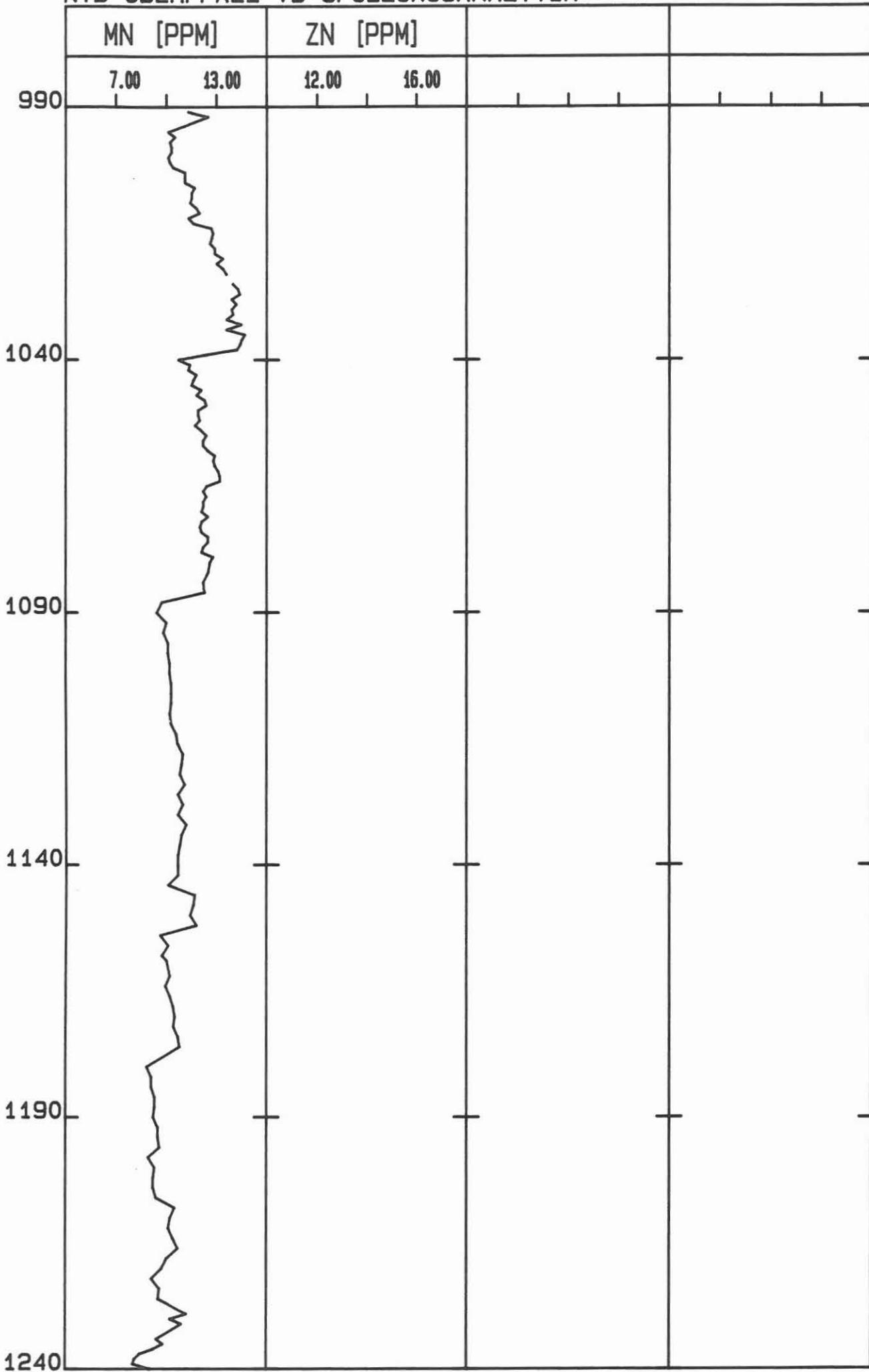
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



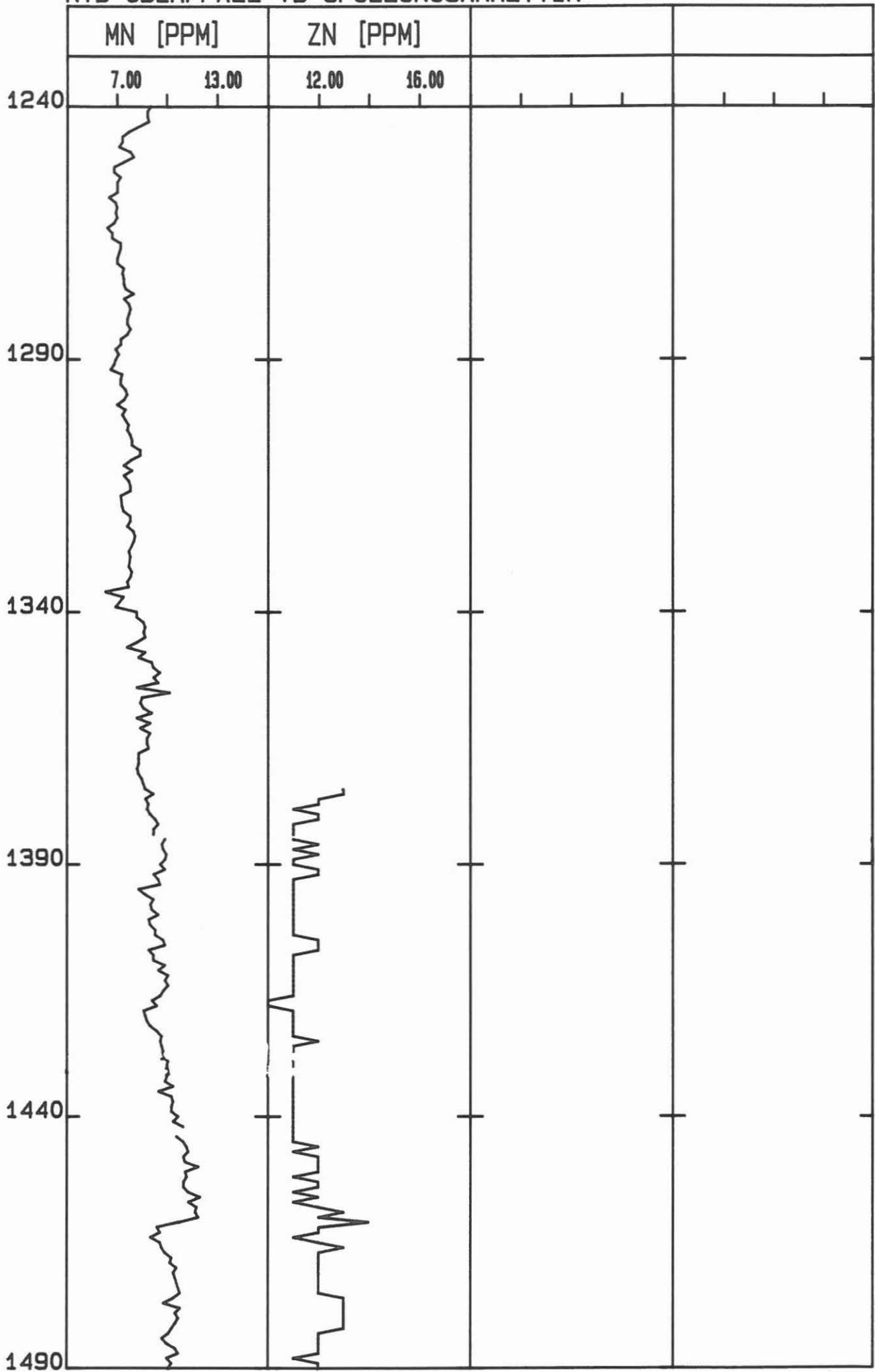
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



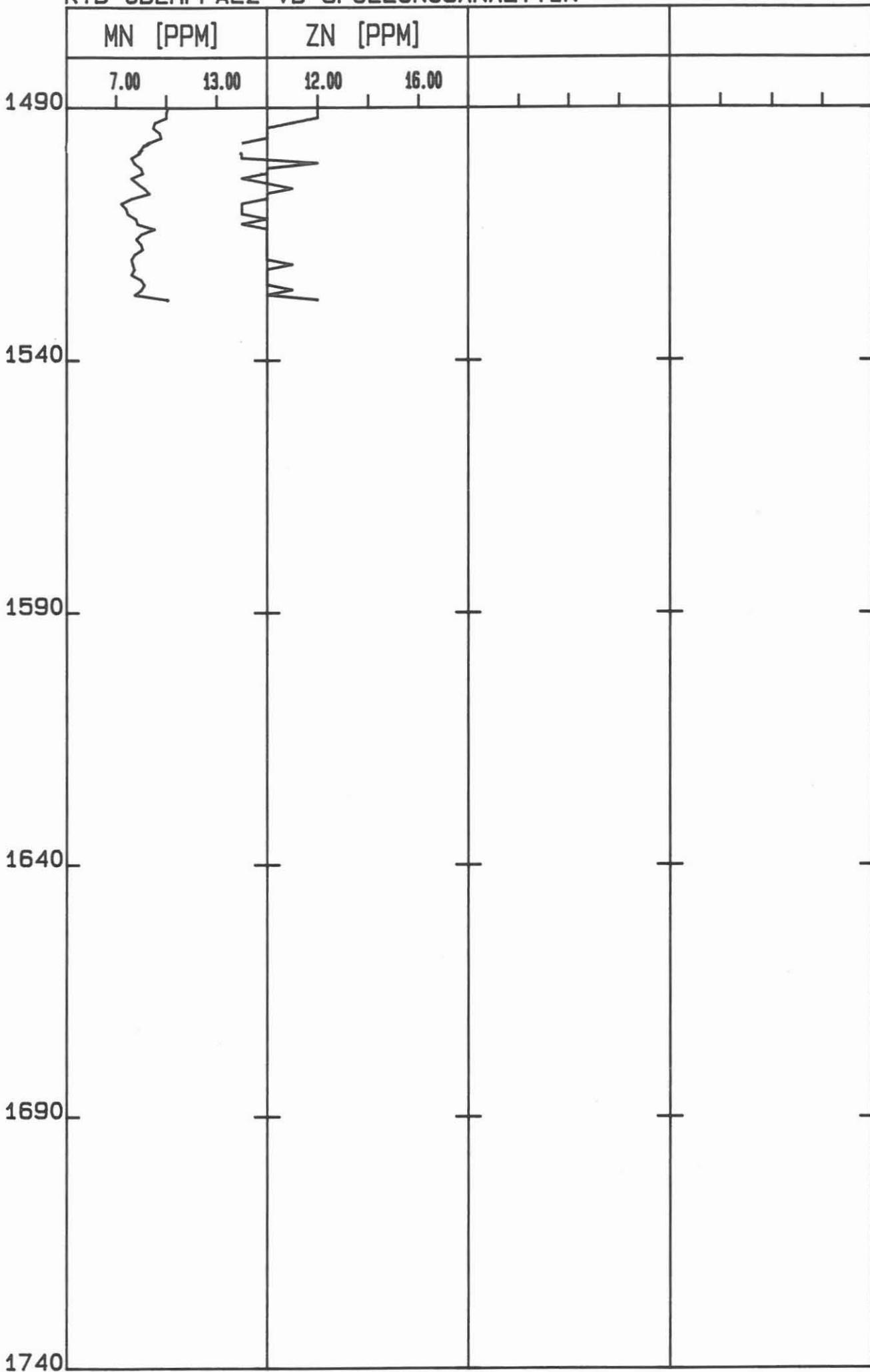
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



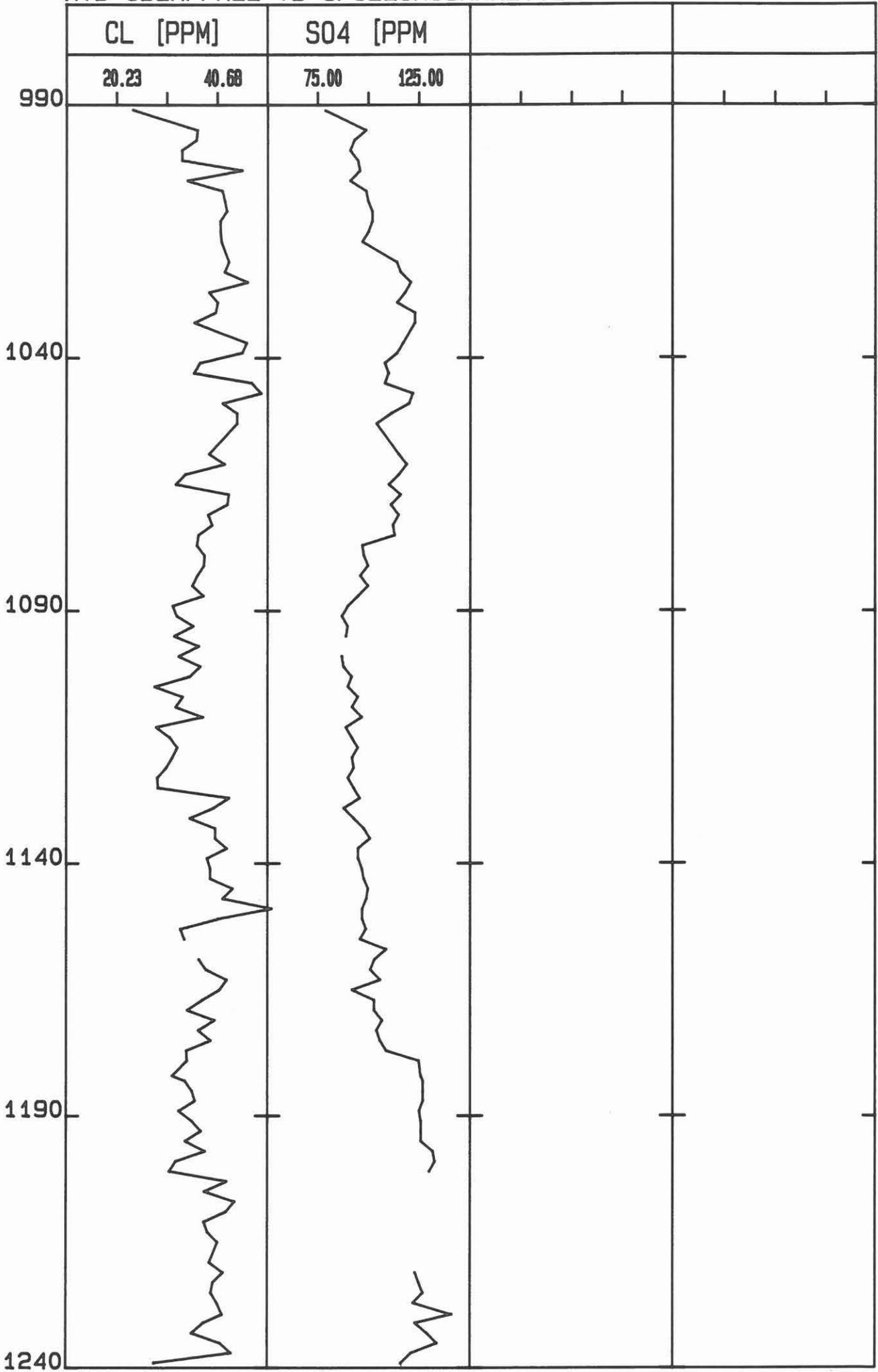
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



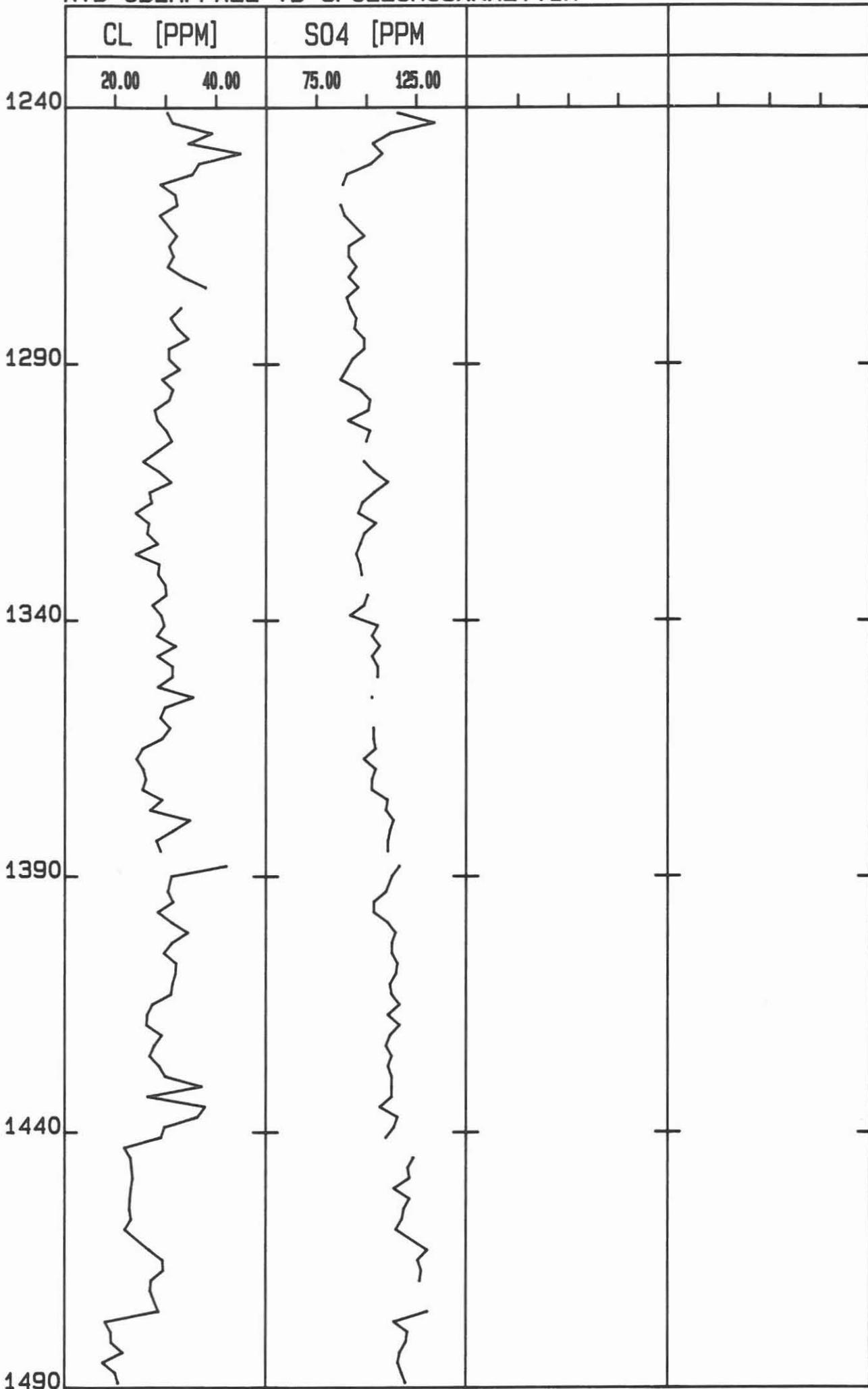
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



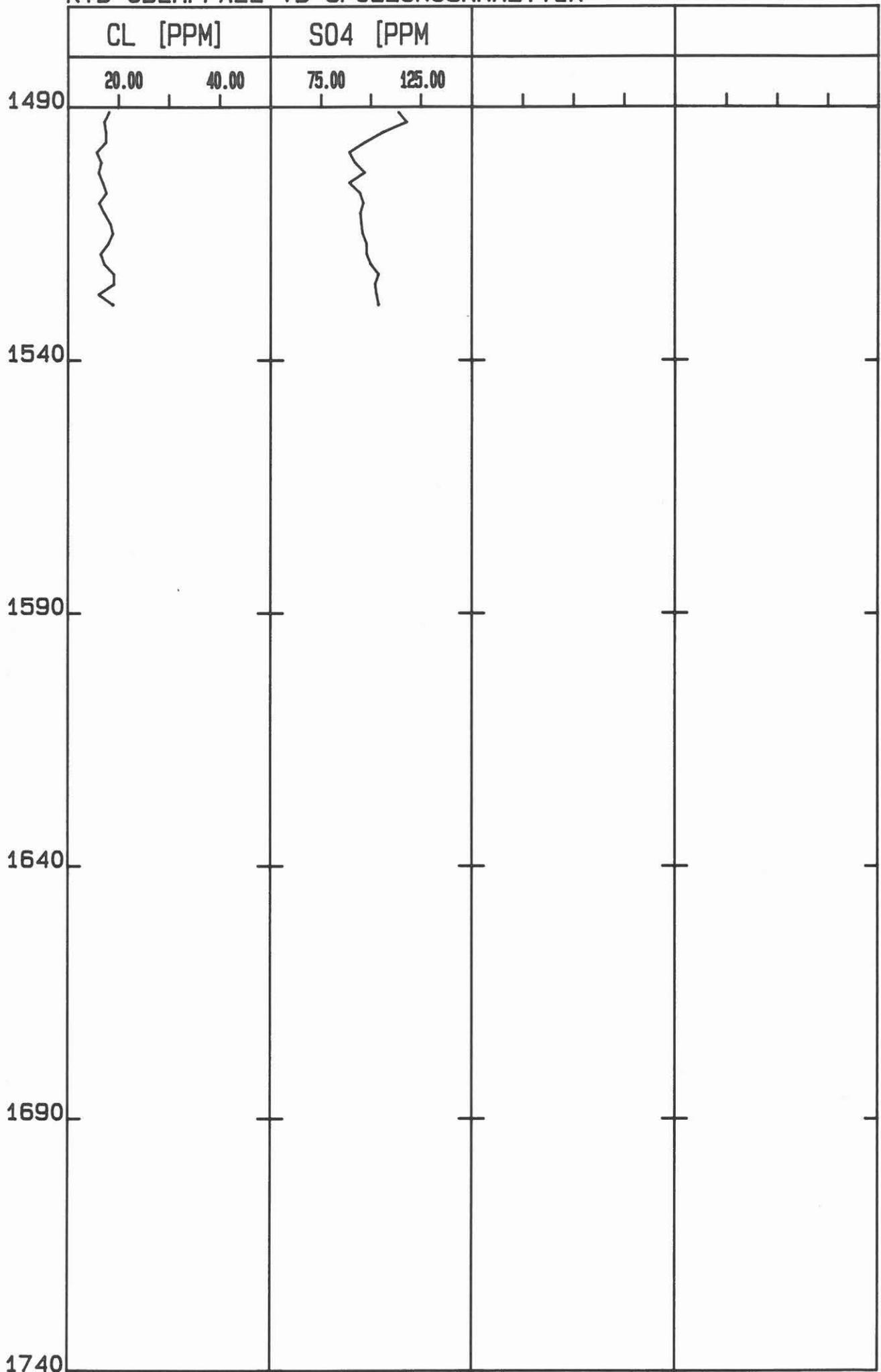
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK

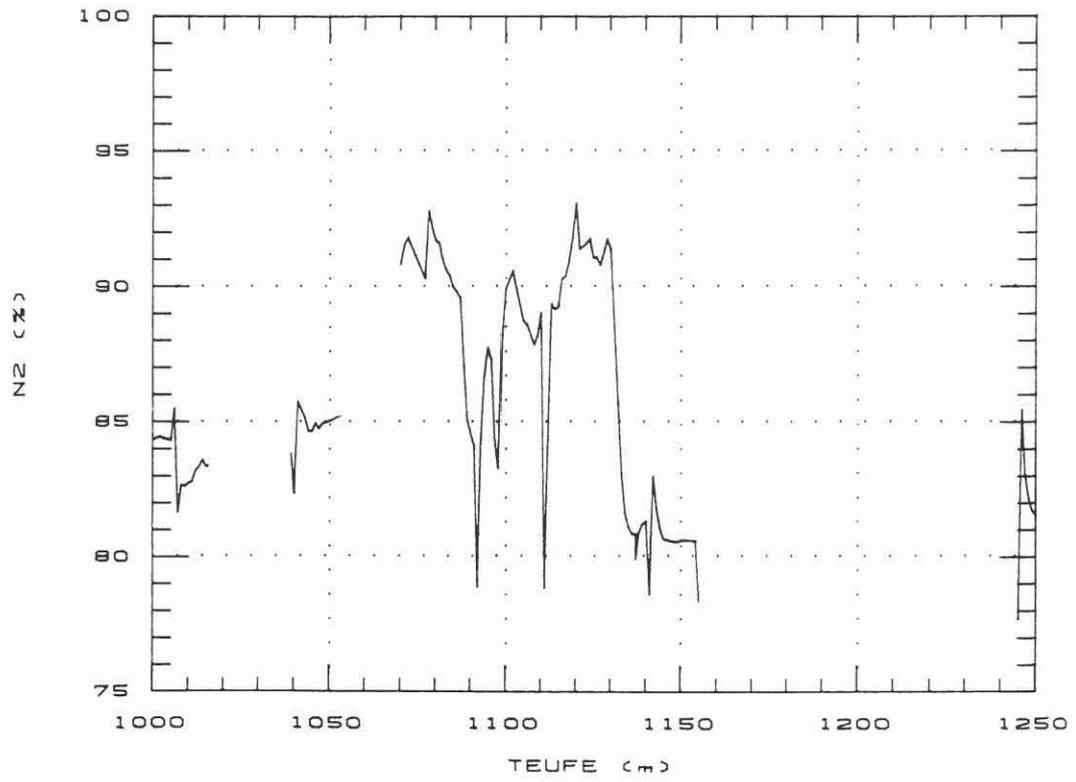


KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK

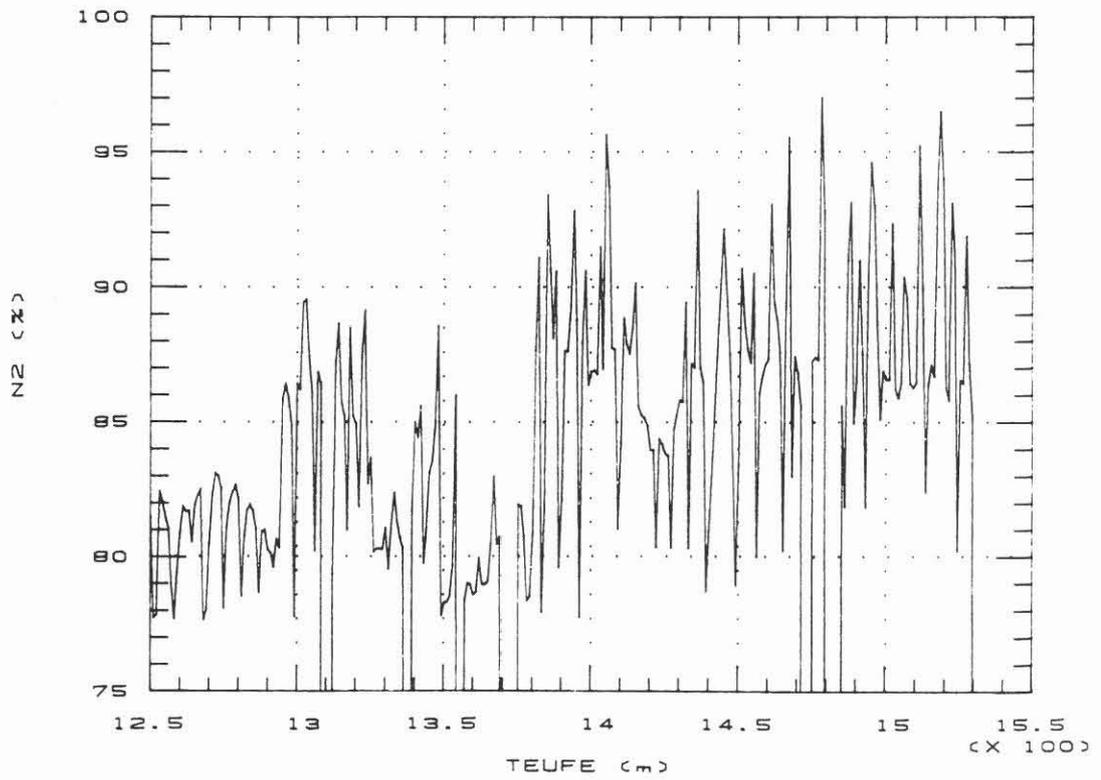


C.9.4 Tiefenlogs der in der Bohrspülung gelösten Gase

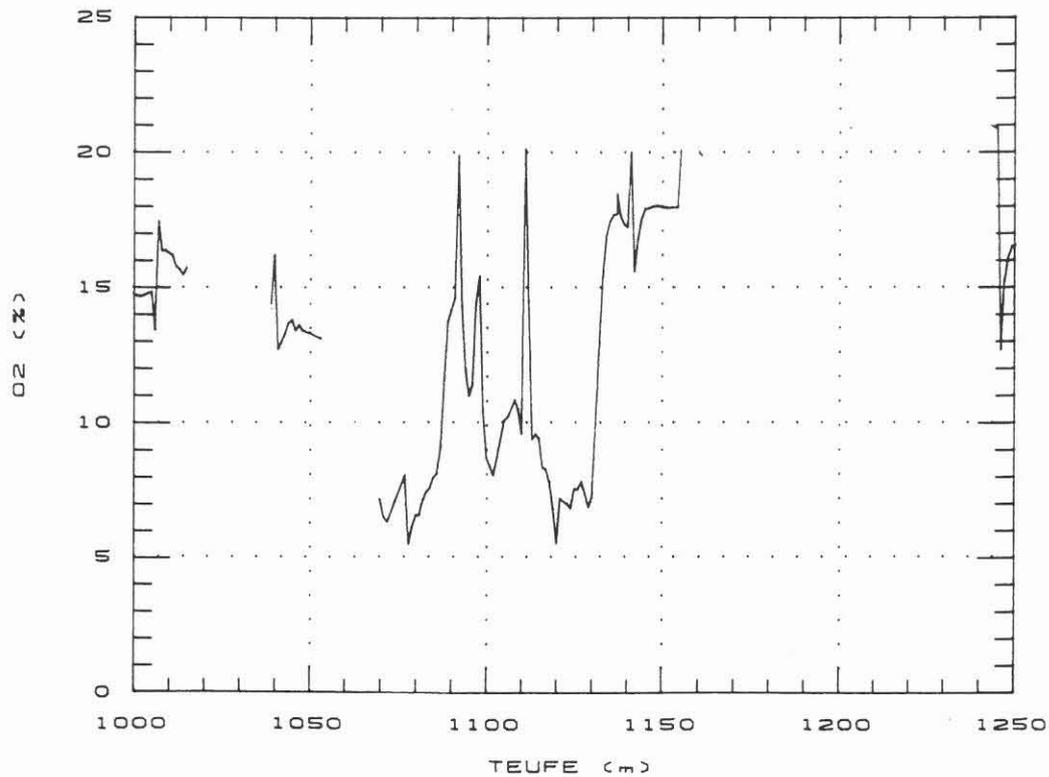
KTB OBERPFALZ VB



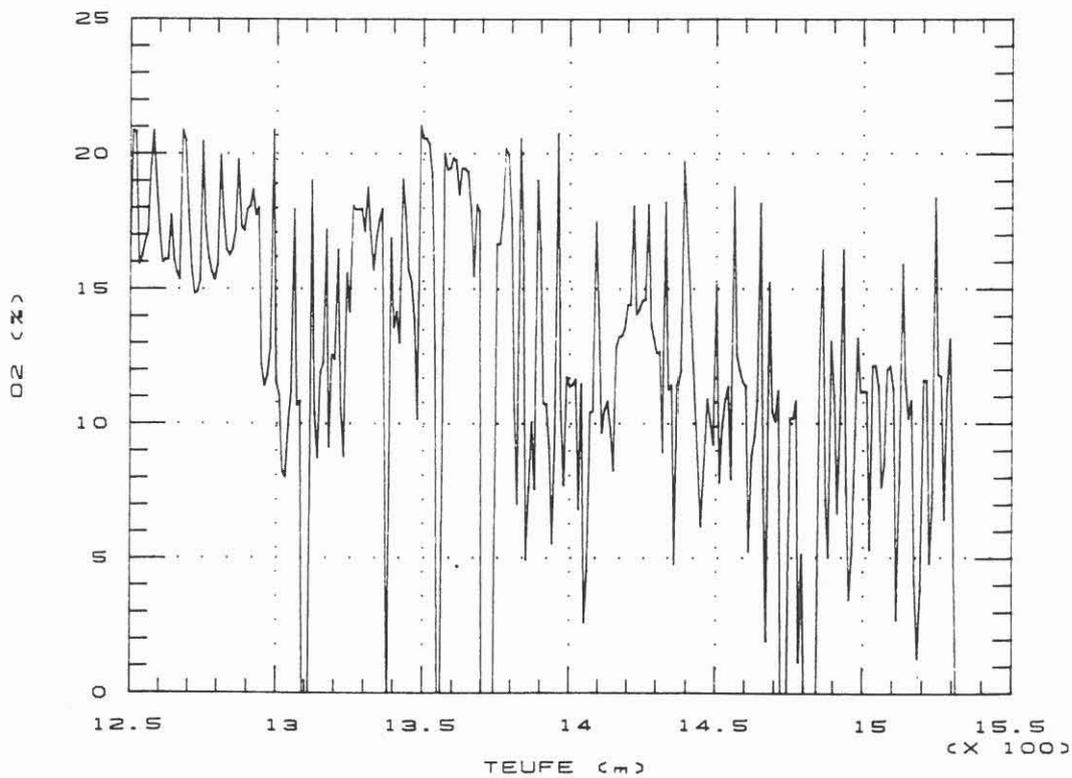
KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK



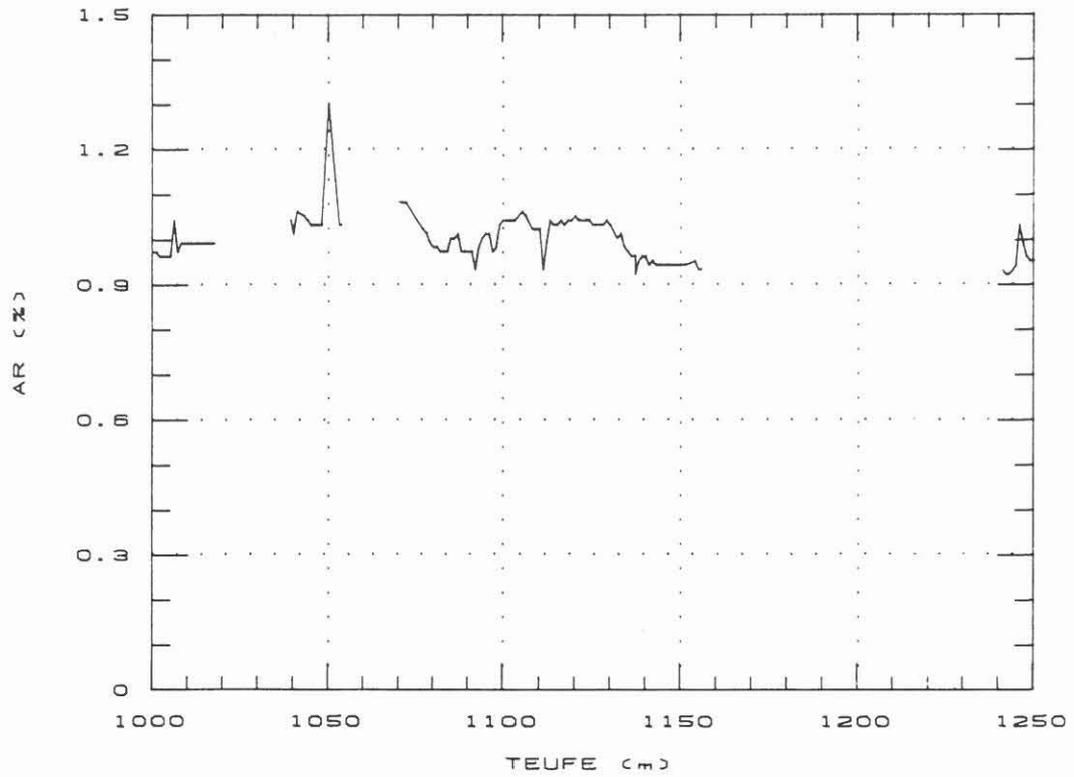
KTB OBERPFALZ VB



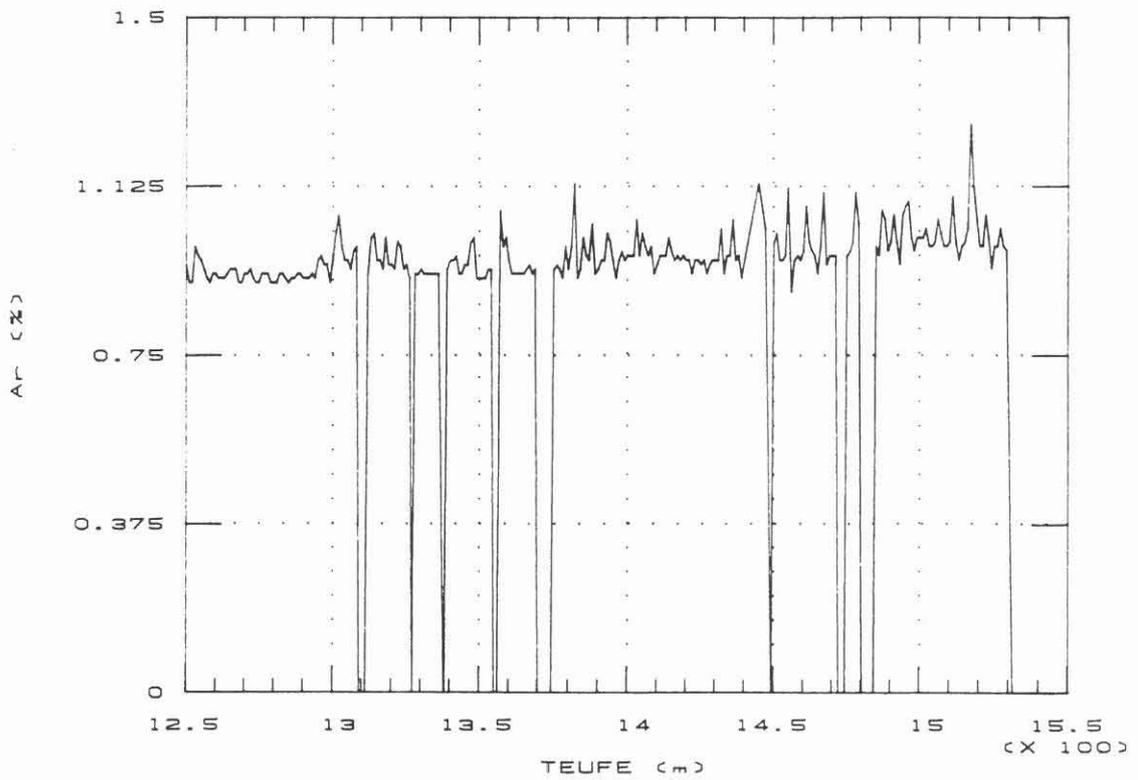
KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK



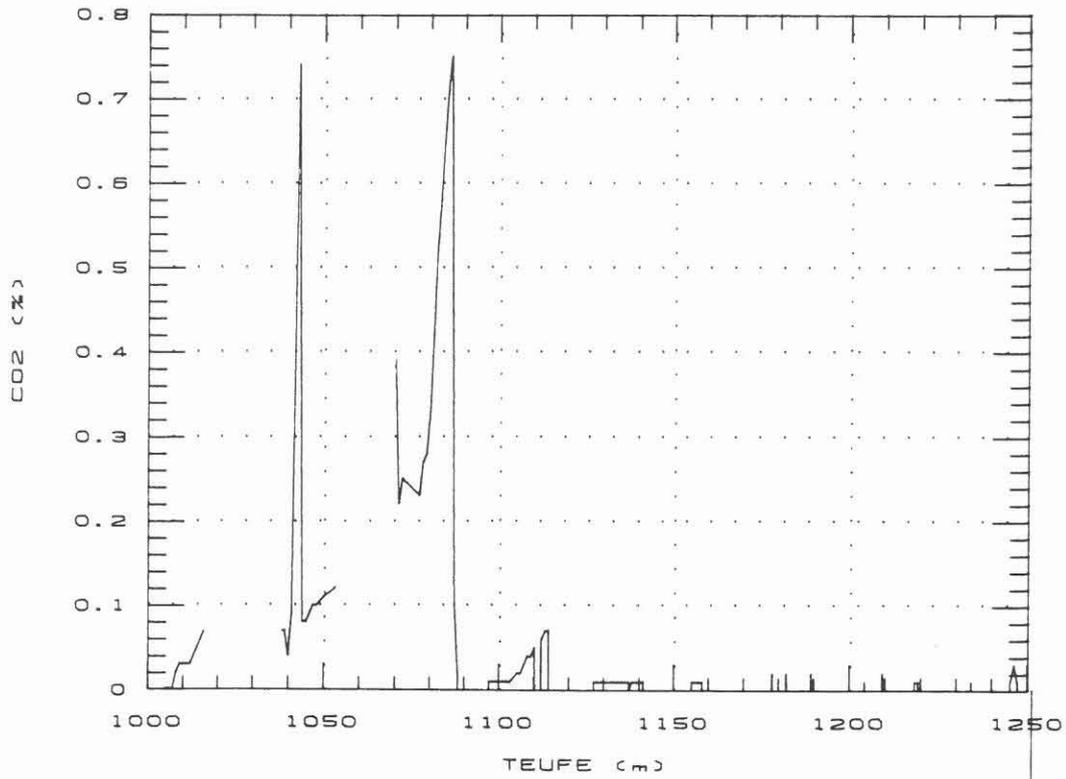
KTB OBERPFALZ VB



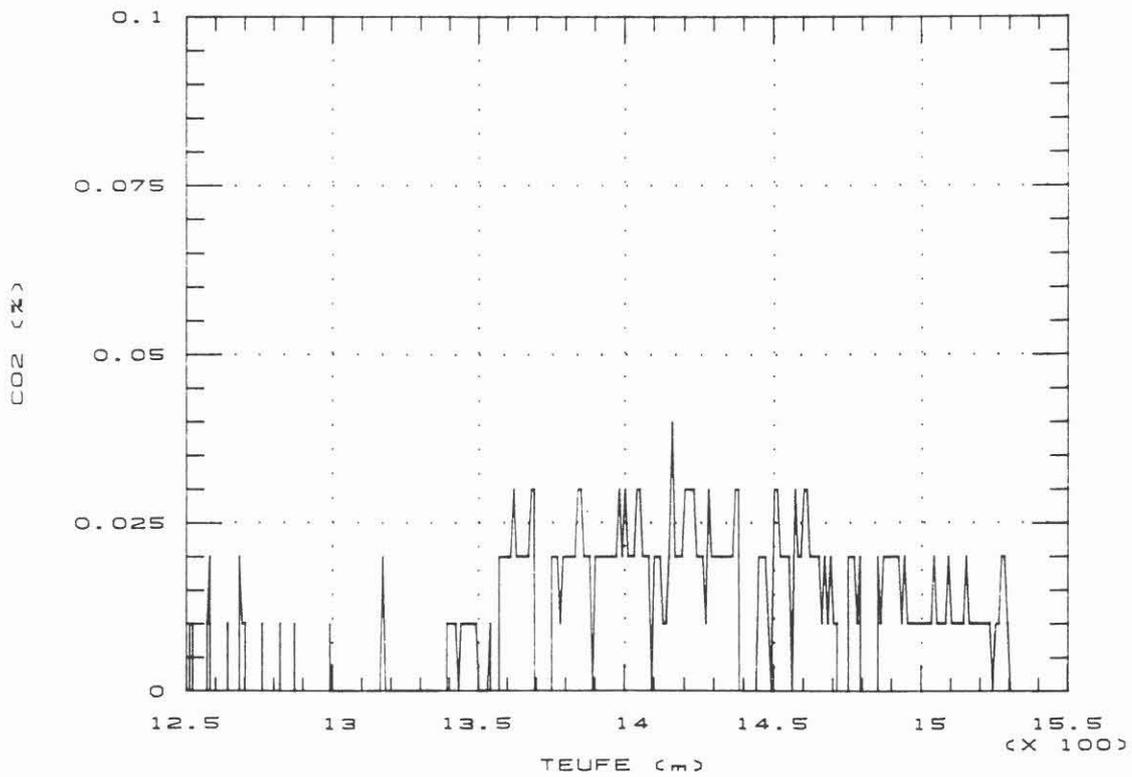
KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK

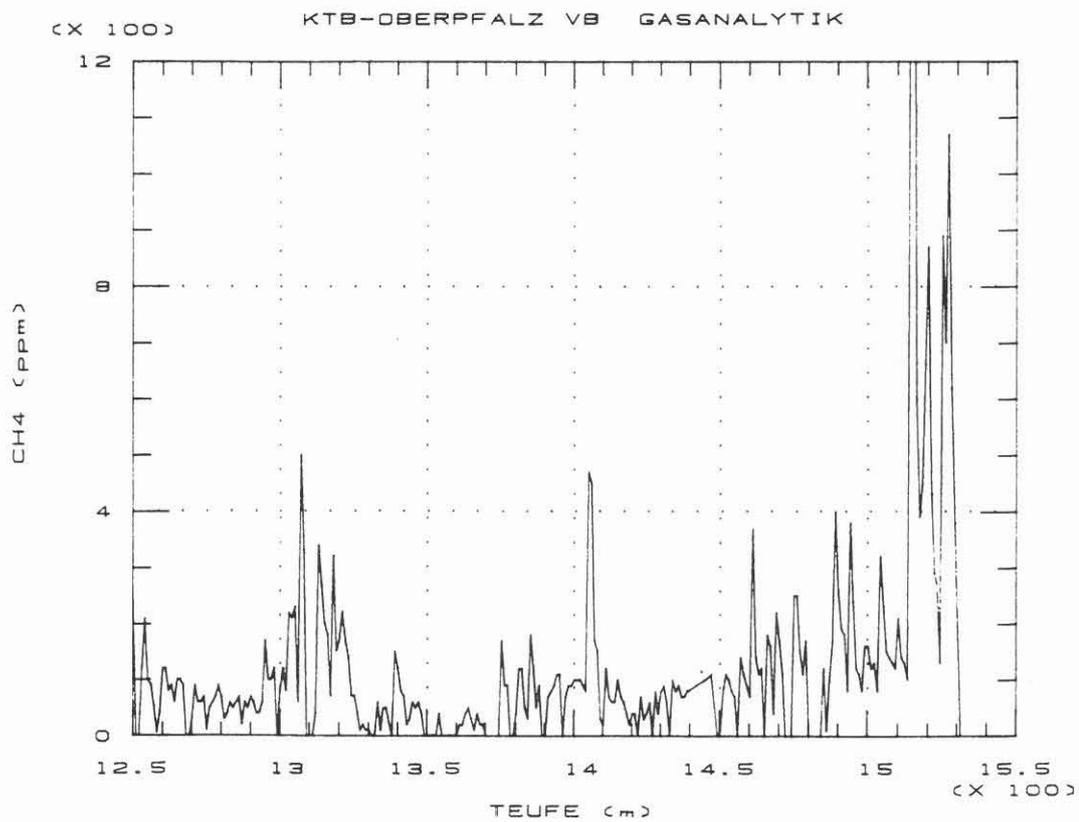
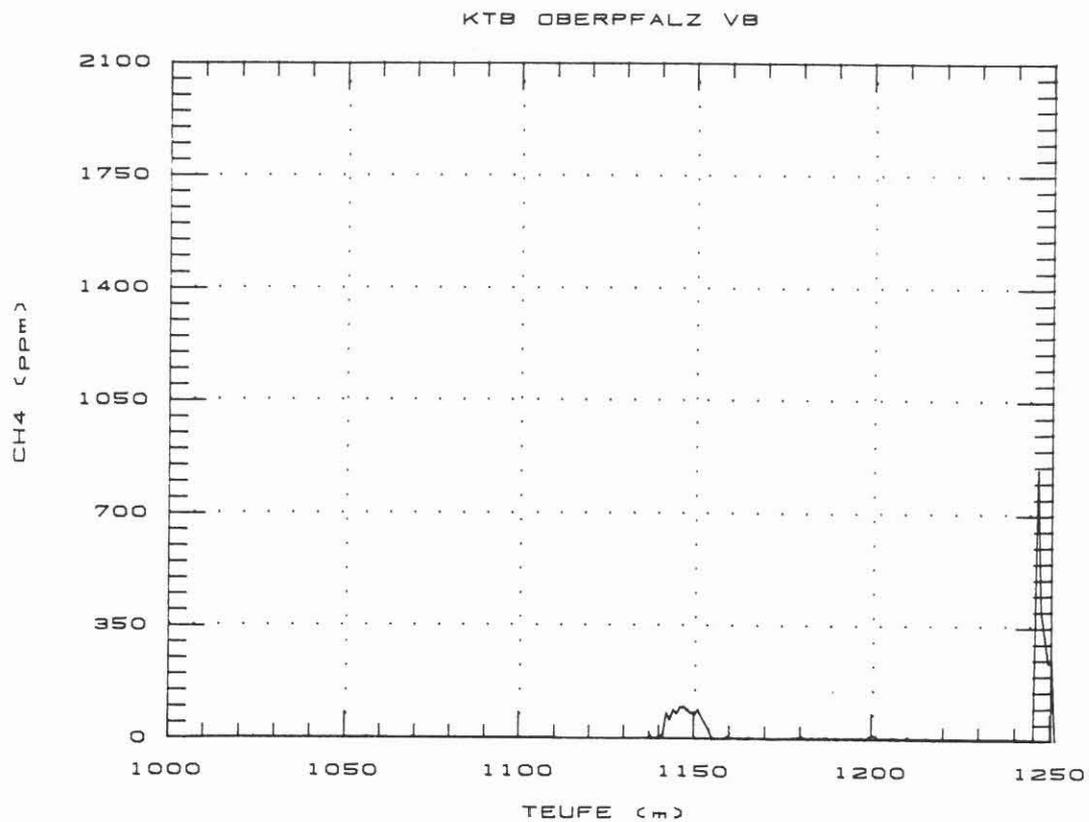


KTB OBERPFALZ VB

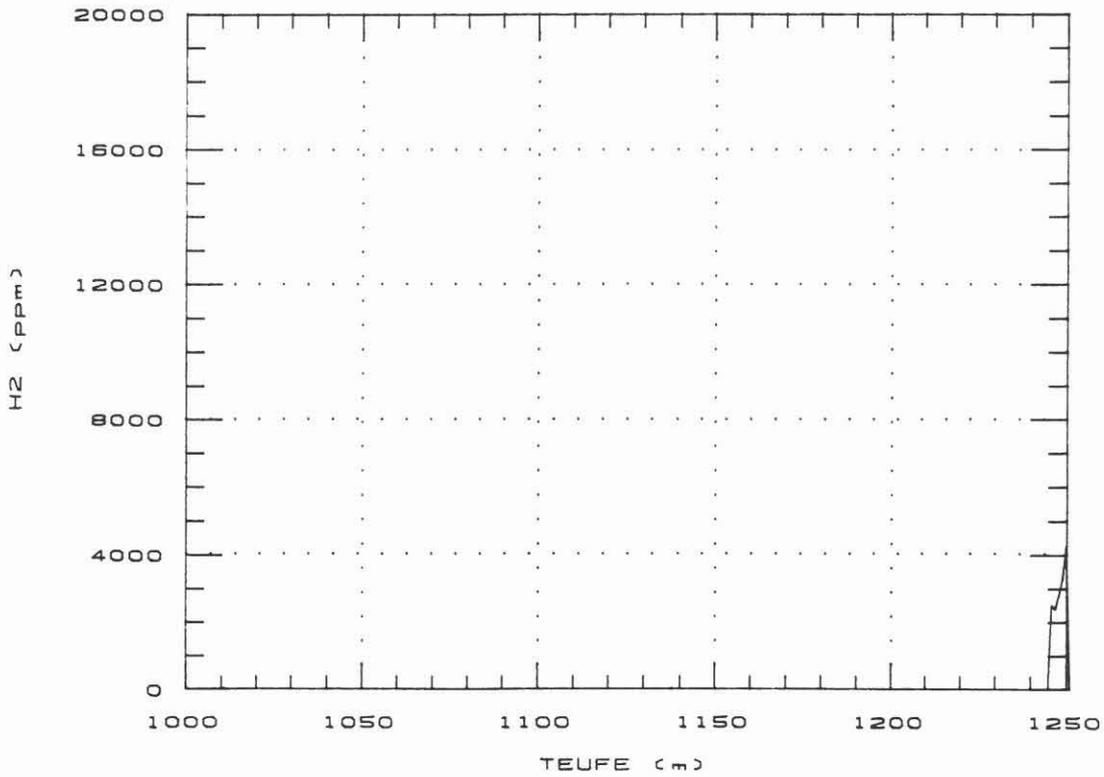


KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK

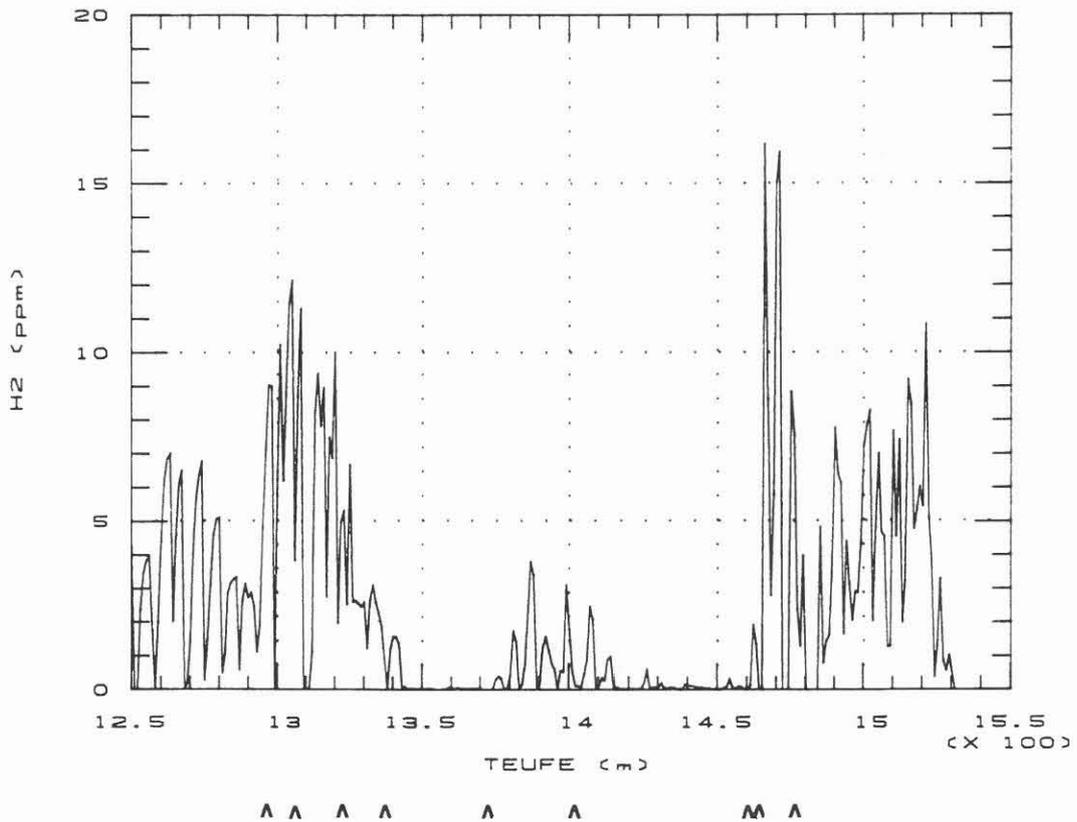




KTB OBERPFALZ VB



(X 1000) KTB OBERPFALZ VB GASANALYTIK



KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK

