

# Elektrisch leitfähige Strukturen in den penninischen und helvetischen Alpen Graubündens (Ostschweiz)

M. Gurk, (Neuchâtel)

## Einleitung

Die Tiefenstruktur der Schweizer Alpen steht im Blickpunkt kombinierter geowissenschaftlicher Arbeiten, die vor allem mit der Methode der Seismik erfolgreich erkundet wurde. Die Ergebnisse einer Vielzahl größerer und kleinerer Profile wurden auf drei Haupttraversen projiziert, die einen Einblick in die komplexe Tektonik der Alpen geben (Pfiffner, Lehner et al. 1997).

Motiviert durch erfolgreiche Magnetotellurik-Studien im Penninikum der Westschweiz, wo eine elektrisch gutleitende Zone an der Basis der penninischen Decken in guter Übereinstimmung mit seismischen Ergebnissen nachgewiesen werden konnte, sollte die Methode nun auch in den Alpen Graubündens entlang der NFP- 20 Osttraverse (Linie E1, Abbildung 1 und 2) und angrenzender Gebiete angewendet werden.

Das Aufzeigen von Strukturen mit gleicher Charakteristik und Geometrie relativ zur penninischen Front in Graubünden ist für das Verständnis der regionalen Mechanismen, die zum Bau der Alpen beitragen, von großem Interesse.

Abbildung 1 zeigt einen geologischen N-S Schnitt durch das in Abbildung 2 dargestellte Meßgebiet. Basierend auf den Ergebnissen der NFP-20 Osttraverse (Teilstück der European Geotraverse, (Blundell, Freemann et al. 1992)) zeigen beide die Kollisionszone der europäischen und afrikanischen Platte und nach Osten den passiven Kontinentalrand zu den austroalpinen Einheiten. Im Norden befinden sich die tektonischen Einheiten des Helvetikums (Aar-, Gotthard-Massiv) gefolgt von den mesozoischen Sedimenten des Penninikums (hauptsächlich Bündnerschiefer) und den penninischen Kristallindecken Adula, Tambo und Suretta. Im Süden begrenzt die Engadin Linie und die Insubrische Linie das Meßgebiet. Markant bildet sich die tertiäre Intrusion des Bergeller Massivs (30 Ma) auf dem Profil ab. Nach Osten hin treffen wir auf die Strukturen des Austroalpins.

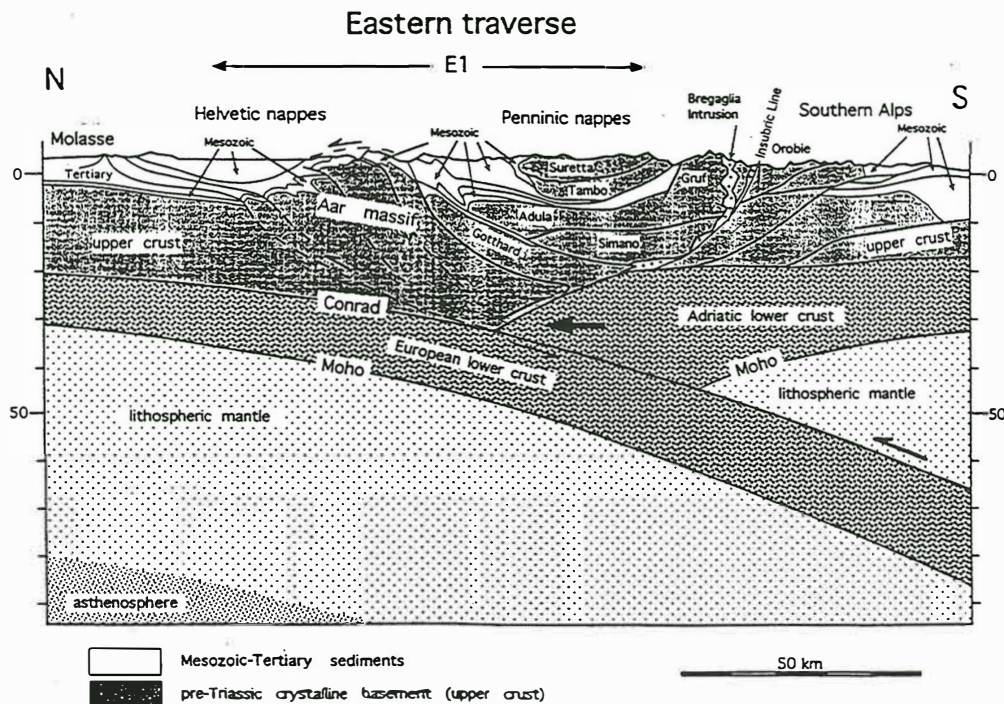


Abb. 1 : Allgemeines geologisches Profil entlang der NFP-20 Osttraverse, erweitert nach Norden in die Molasse und nach Süden in das Po Becken, (Pfiffner and Hitz 1997).

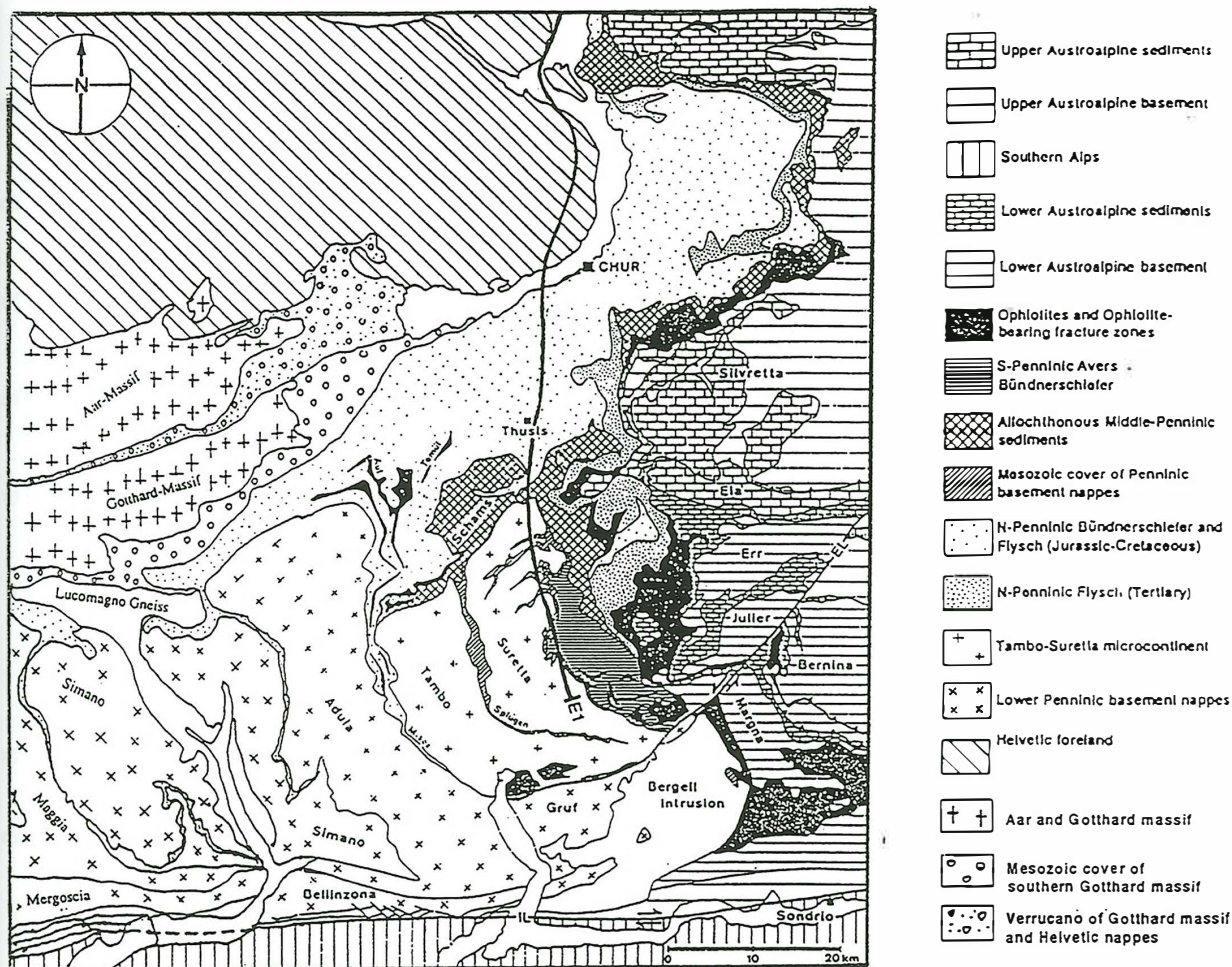


Abb. 2: Tektonische Karte Graubündens und benachbarter Gebiete Italiens und Österreichs, nach Schmid (Schmid, Rück et al. 1990).

In der tektonischen Entwicklung des Orogens sind die penninischen Kristallindecken zunächst übereinander und anschließend seitlich nach Osten unter das Austroalpin abtauchend überschoben worden, so daß dachziegelähnlich in dieser Richtung immer tektonisch höhere Einheiten aufgeschlossen werden. Die einzelnen Kristallindecken können durch Reste ihrer einstigen sedimentären Bedeckung untereinander getrennt sein, die rezent in der Misox Zone, Splügen Zone und den Averser Schiefern anstehen. Ihren Ursprung haben die Gesteine des Penninikums im Tiefseebereich der alpinen Geosynklinale.

Dieser Bereich des alpinen Tethysmeeres war schon vor der eigentlichen Gebirgsbildung (Ende Kreide, Tertiär) von Schwellen durchzogen, die den Ablagerungsraum in verschiedene Teiltröge und pull-apart Becken trennte und von denen aus das Material für die Bildung der Bündnerschiefer als turbiditische Schüttungen eingetragen wurde. Hier entstanden auch die vielfach im Meßgebiet anzutreffenden Ophiolithe.

Sedimentologische Studien an Bündnerschiefern (Steinmann 1994) entdeckten in den Nollaton Serien einen organischen Kohlenstoffgehalt von mehr als 1 wt %. Diese hohe Konzentration organischen Materials läßt auf einen niedrigen spezifischen Widerstand der Sedimente schließen, die wir mit Mithilfe der Magnetotellurik zu kartieren erhoffen.

Die wichtigsten lithostratigraphischen Einheiten der Bündnerschiefer sind die Tomül- und Grava-Decke, die im wesentlichen aus Tonschiefern und sandigen Kalken mit unterschiedlich dicken schieferigen Zwischenlagen bestehen. Der Quarzgehalt der sandigen Kalke kann stark variieren, quarzreiche Sandsteine sind nicht ungewöhnlich.

Die größeren Tonschieferintervalle zeigen ein breites Spektrum von schwarzen, karbonatfreien bis zu kalkigen Tonschiefern, (Steinmann 1994).

## Vorläufige Ergebnisse der Magnetotellurik-Messungen

Abbildung 3 zeigt die bisher errichteten 64 Meßpunkte. Die Datenaufnahme erfolgte über eigene Aufnahmeapparaturen mit ECA-Magnetfeldspulen (Frankreich) und Filloux-Silberchloridelektroden. Die gewählte Abtastrate betrug 0.24 s. Der auswertbare Periodenbereich liegt für einer Standzeit der Geräte von 2 bis 3 Tagen bei  $T = 1 - 300$  s.

Beispiele für die genügende Datenqualität der Sondierungskurven sind in Abbildung 4 aufgeführt. Die Werte der Anisotropie und Skewness weisen auf eine heterogene Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit hin. Sie zeigen für die Bündnerschiefer und für die östlichen Stationen (Gruppe C2) im Vergleich zu den angrenzenden Strukturen mit ausgeprägter 3-D Charakteristik (Tambo, Suretta und Averser Schiefer) ein eher zweidimensionales Verhalten. Die mesozoischen Sedimente (Bündnerschiefer, Verrucano und Flysche) liefern scheinbare spezifische Widerstände um etwa 1-100  $\Omega\text{m}$  und heben sich gegenüber den penninischen kristallinen Decken und den helvetischen Massiven ( $\rho_s = 1000 - 6000 \Omega\text{m}$ ) deutlich ab. Die Rohdaten liefern jedoch keinen Hinweis auf eine vermutete südliche Erstreckung der Bündnerschiefer unterhalb der Kristalldecken oder eine Verbindung der Bündnerschiefer entlang der Adula-Stirn und unterhalb der Tessiner Kulmination hinüber zu den entsprechenden Sedimenten (Schistes Lustrés) in der Westschweiz.

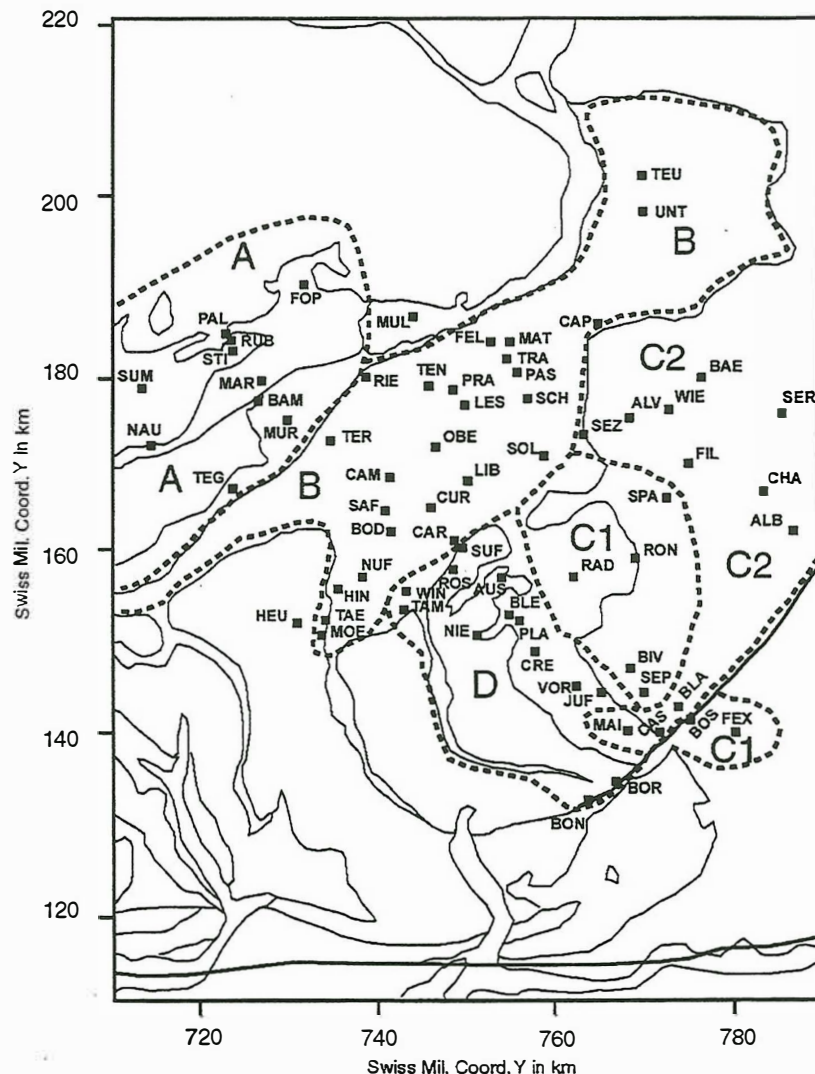
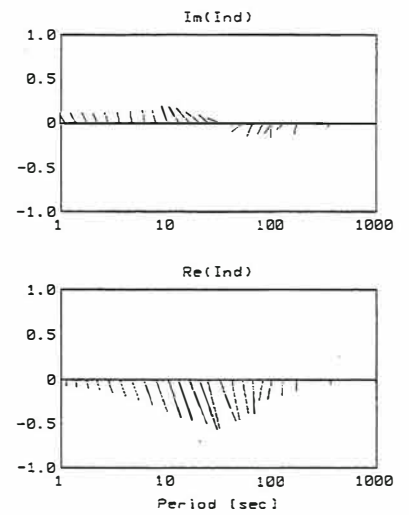
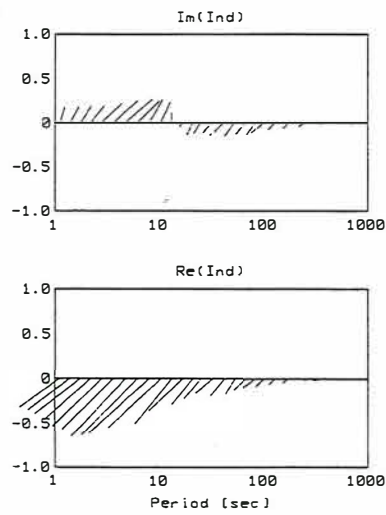
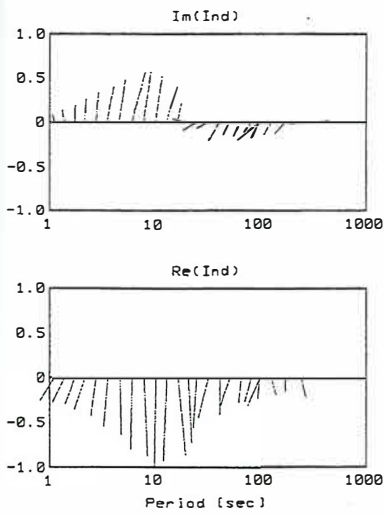
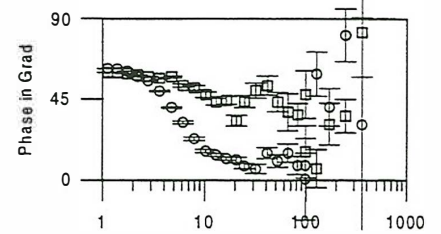
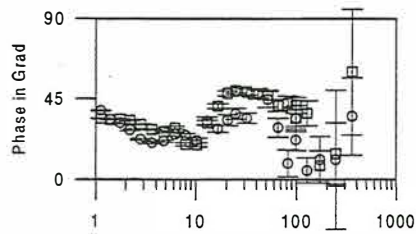
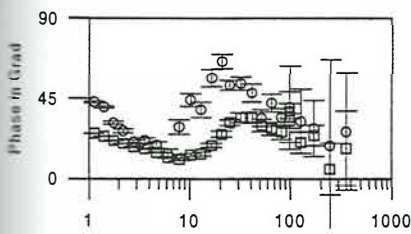
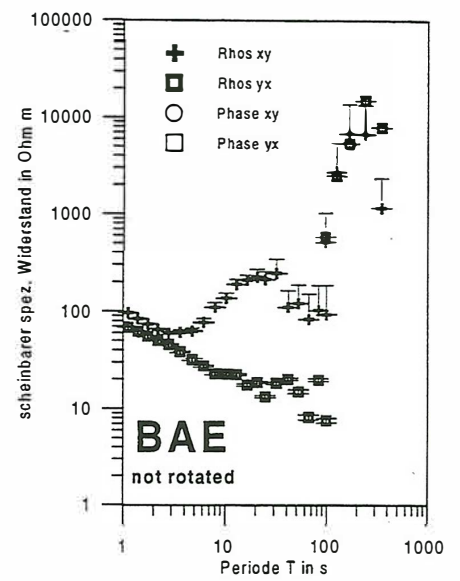
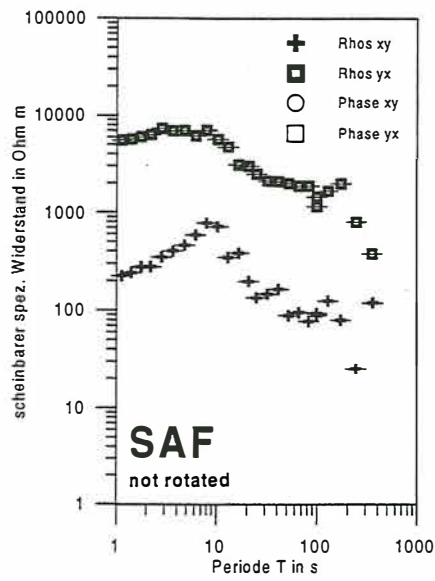
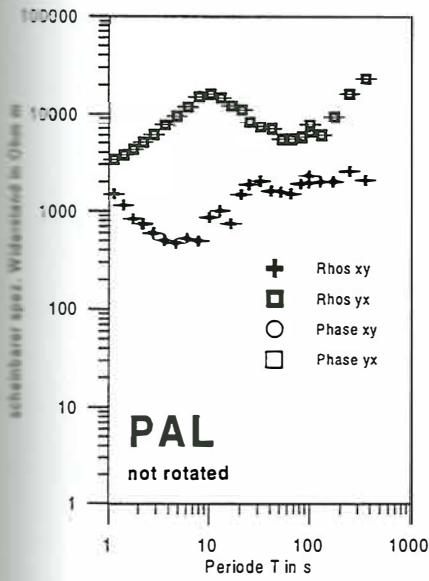


Abb. 3: Die Lage der MT-Meßpunkte (gefüllte Quadrate) in den verschiedenen Gruppen A-D (unterbrochene Linie) mit wichtigen Strukturgrenzen in Graubünden..



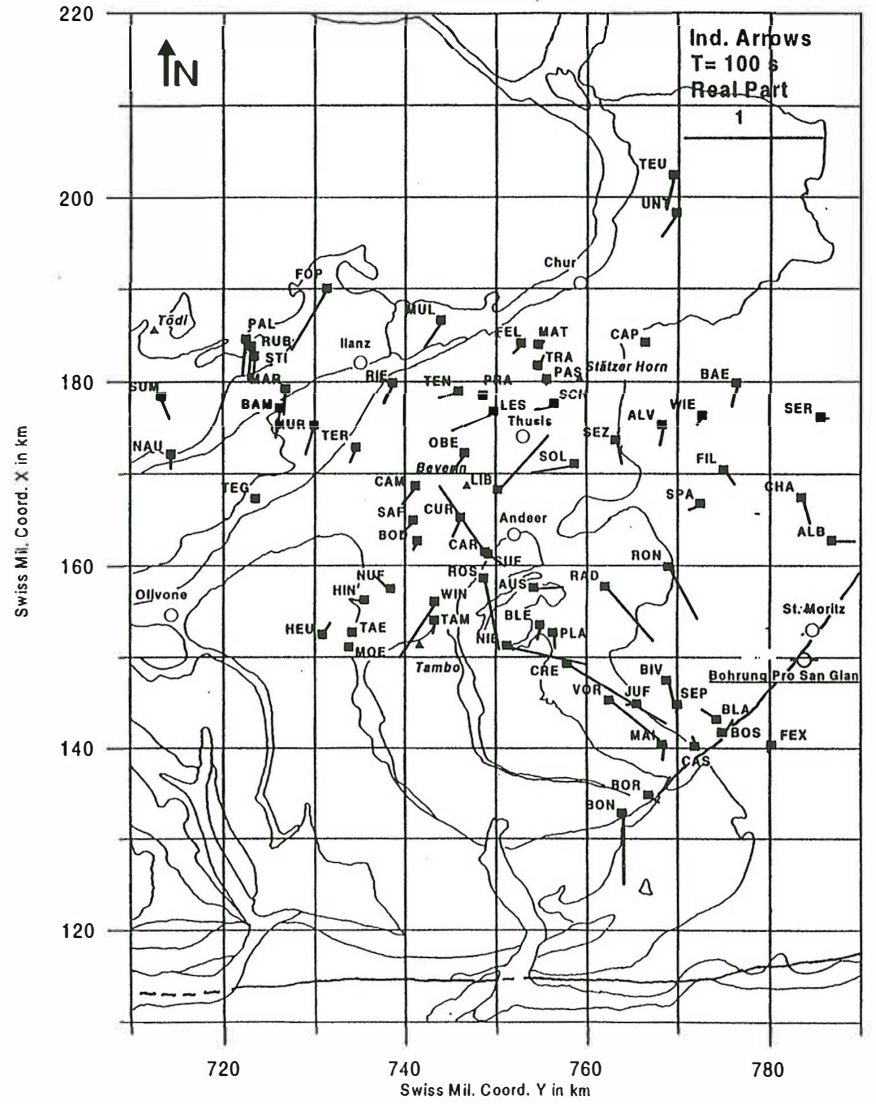
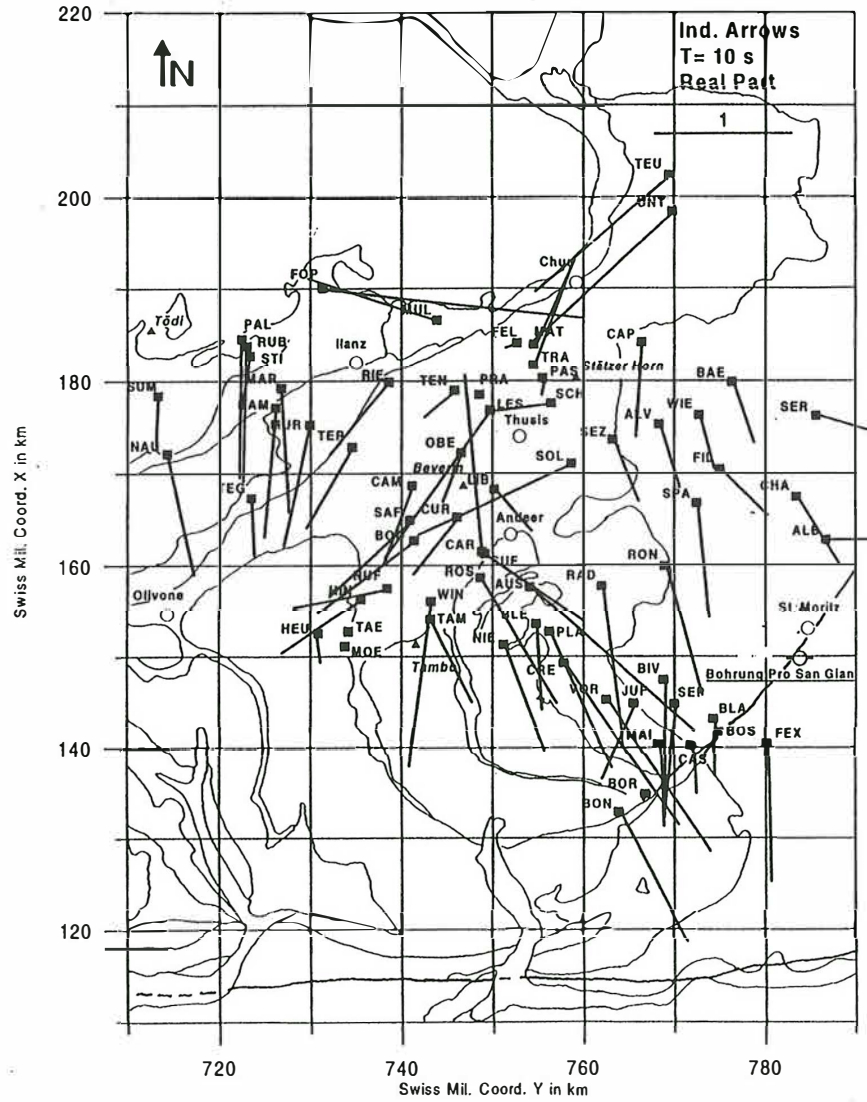
PAL (Gruppe A)

SAF (Gruppe B)

BAE (Gruppe C2)

Abb. 4 : Beispiele ungedrehter Sondierungskurven und Induktionspfeile nach Schmucker aus Graubünden.

Abb. 5 : Induktionspfeile (Realteile) nach Schmucker für die Perioden  $T = 10$  s und  $T = 100$  s.



Als wichtigstes Ergebnis stellt sich für die MT-Meßpunkte auf den Bündnerschiefern ein periodenunabhängiges Umklappen der Realpfeile in deren Streichrichtung ein (Abbildung 5). Die maximale Induktivität liegt bei allen Meßpunkten bei etwa  $T = 10$  s und verschiebt sich nach Osten zu größeren Perioden. Dies markiert den Kontakt der mesozoischen Sedimente zum kristallinen Basement und steht im guten Einklang zu dessen Abtauchen nach Osten.

Auf den Bündnerschiefern und auf den im Norden angrenzenden helvetischen Sedimenten zeigen die Realpfeile etwa in die regionale Streichrichtung ( $65^\circ$ - $70^\circ$  gegenüber Nord) der Schweizer Alpen. Diese Richtung diente auch zur Projektion der seismischen Teilprofile auf die NFP-20 Osttraverse und ist gleich der Richtung der E-Polarisation.

Südlich der Bündnerschiefer zeigen sie in SE Richtung, diejenige Richtung, die für das Penninikum der Westschweizer Alpen signifikant ist. Dieselbe Richtung wurde auch von Teufel (Teufel 1983) auf einem MT-Profil über den Nordrand der Alpen (Molasse) bei Berchtesgaden ermittelt. Die Richtung SE der Realpfeile darf somit mit einer überregionalen Struktur (Molasse oder Penninische Hauptüberschiebung) in Verbindung gebracht werden.

### Regionale und lokale leitfähige Strukturen

Um die Magnetfelddaten zusammen mit den elektrischen Feldern auswerten zu können, soll die Ursache für die anomale Richtung der Realpfeile auf den Bündnerschiefern geklärt werden.

Real- und Imaginärpfeile (vgl. Abbildung 4) zeigen das zu erwartende Verhalten bezüglich einer 2-D Struktur: Zur Periode  $T_{\max}$  der maximalen Induktivität der Realpfeile durchlaufen die Imaginärpfeile Null und wechseln ihre Richtung um  $180^\circ$ . Auffällig sind jedoch die grossen Längen der Realpfeile, die im Untersuchungsgebiet durchaus Werte über 1 erreichen.

Die Sonderstellung der Bündnerschiefer ist in dem Meßgebiet durch deren Einbettung zwischen den Gotthard- und Aar-Massiven und den kristallinen Decken im Süden gegeben und durch ihre Streichrichtung von etwa  $45^\circ$  gegenüber Nord. Nach Nordosten ist ein Kontakt der lokalen Struktur mit den Sedimenten der (Subalpinen) Molasse ( $\rho_s = 1-30 \Omega m$ ) wahrscheinlich. Die Front der Penninischen Hauptüberschiebung ist ebenfalls ein Kandidat für eine großräumige regionale Struktur in der Ströme induziert und anschliessend in den Bündnerschiefern focussiert werden. Sie streicht etwa entlang der nördlichen Begrenzungslinie der Gruppe **B** (Abbildung 3) aus, und knickt dann auf der Höhe der Stationen TEU und UNT nach Nordwesten, dem Nordrand des Aar-Massiv folgend, ab. In diesem Fall lägen regionale und lokale Struktur übereinander und rechtwinkelig zueinander. Die Averser Schiefer, eingebettet zwischen der Suretta und der Silvretta Decke, müssen an dieser Stelle ebenfalls als eine mögliche begrenzte Leitfähigkeitsanomalie angesehen werden.

Im folgenden wird der Datensatz in Anlehnung an die von P. Ritter (Ritter and Banks 1994; Ritter 1996) vorgestellten Methode für 2-D Strukturen hin untersucht. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen die komplexwertigen Komponenten  $A$  und  $B$  der unrotierten magnetischen Übertragungsfunktionen aller Stationen, wie sie durch die lineare Beziehung zwischen den horizontalen und vertikalen Komponenten des Magnetfeldes gegeben sind:

$$B_z = A \cdot B_x + B \cdot B_y \quad (1)$$

Unter dem Einfluß magnetischer Verzerrung lassen sich diejenigen Komponenten, die auf der lokalen Leitfähigkeitsanomalie gemessen wurden, wie folgt formulieren :

$$A^l = D_{zx}'' \cdot [-Z_E \cdot \sin \Theta_r \cdot \cos \alpha + Z_B \cdot \cos \Theta_r \cdot \sin \alpha] \quad (2)$$

$$B^l = D_{zx}'' \cdot [+Z_E \cdot \cos \Theta_r \cdot \cos \alpha + Z_B \cdot \sin \Theta_r \cdot \sin \alpha], \quad (3)$$

mit  $D_{zx}''$  magnetischer Verzerrungsparameter im Meß-Koordinatensystem;  $Z_B, Z_E$  regionale Impedanzen im 2D-Fall des gedrehten regionalen Koordinatensystems:  $\underline{Z}^0 = \begin{pmatrix} 0 & Z_E \\ Z_B & 0 \end{pmatrix}$ ;  $\Theta_r, \Theta_l$  regionale bzw. lokale Streichrichtung (im Gegenuhrzeigersinn) und  $\alpha = \Theta_l - \Theta_r$  Winkel zwischen regionaler und lokaler Leitfähigkeitsstruktur.

Ohne auf weitere Details einzugehen, können die Übertragungsfunktionen einer jeden Station j bezüglich ihrer Periodenabhängigkeit und tektonischer Charakteristik in die fünf verschiedenen Gruppen **A, B, C1, C2** und **D** eingeteilt werden (vgl. Abbildung 3).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Allen Kurven gemein ist ein etwa gegenphasiger Verlauf der Real- und Imaginärteile beider Übertragungsfunktionen, wobei die Imaginärteile die Realteile um einige Sekunden voreilen. Die Amplituden wechseln in den verschiedenen Gruppen und sind daher ein wichtiges Auswahlkriterium.

Allgemein zeigt sich folgendes periodenabhängiges Verhalten: Die Realteile  $A_j$  durchlaufen ein ausgeprägtes Minimum bei ca.  $T = 10$  s und steigen mit zunehmender Periode sanft an, wohingegen die zugehörigen Imaginärteile nach dem Durchfahren eines Maximums eher um die Amplitude Null weiterlaufen.

Die Realteile  $B_j$  zeigen über die Periode kein ausgeprägtes Minimum. Ein schwacher Effekt eines in Nord-Süd verlaufenden Stromsystems mit einer induktiven Response ebenfalls um  $T = 10$  s läßt sich jedoch anhand der zugehörigen Imaginärteile  $B_j$  ausmachen. Generell verlaufen die Imaginärteile ruhiger als die Realteile.

Die Kurven Realteile  $A_j$  der Gruppe **C2** (ganz im Osten des Meßgebietes) zeigen nur noch ein schwach ausgebildetes Minimum zu etwas grösseren Perioden  $T$ . Dafür zeigen die Realteile  $B_j$  einiger Stationen dieser Gruppe (SER, CHA, ALB und BAE) bei  $T = 15$  s einen deutlichen Hinweis auf ein in Nord-Süd verlaufendes Stromsystem:

Von diesem Verhalten abweichend bilden auch die Kurven der Realteile  $B_j$  der Gruppe **B** (Stationen auf den Bündnerschiefern) zur Periode  $T = 10$  s ein Minimum. Die Amplituden beider Realteile dieser Gruppe erreichen in der Regel Maximalwerte von etwa 0 bis -1 oder +1, was sich in den extremen Längen der Realteile der Gruppe auswirkt. Dies gilt in auch für die Realteile  $A_j$  und  $B_j$  der magnetischen Übertragungsfunktionen der Gruppe **D** (Averser Schiefer).

Die Realteile  $B_j$  der Gruppe **A** verlaufen sehr ruhig um die Amplitude Null, was auf eine schwache Magnetfeldvariation in Ost-West Richtung schliessen läßt und sich direkt in den südwärts gerichteten Realteilen dieser Gruppe zeigt.

#### Fazit :

Im Vergleich zu den übrigen Gruppen ist somit der Verlauf der Realteile  $A_j$  und  $B_j$  in der Gruppe **B** fast gleich. In der Gruppe **D** hingegen ist ihr Verlauf um etwa den Faktor (-1) verschieden. Für die Gruppe **A** scheint es kaum eine Anregung in Ost-West Richtung zu geben.

Unter welchen Bedingungen sind die Komponenten der Übertragungsfunktionen der Gruppe **B** gleich und die der Gruppe **C** um (-1) verschieden?

Diese Frage führt auf den in Abbildung 7 skizzierten Spezialfall bezüglich der geometrischen Konfiguration zwischen lokalen und regionalen leitfähigen Strukturen und ihrer räumlichen Lage im geographischen Koordinatensystem:

2-D Fall :  $\alpha = 0^\circ$  oder  $\alpha = 90^\circ$  (lokale Streichrichtung parallel oder senkrecht zur regionalen Streichrichtung). Dann vereinfachen sich die Gleichungen (2) und (3) zu :

$$\alpha = 0^\circ : \quad A^l = D_{zx}'' \cdot [-Z_E \cdot \sin \Theta_r] \quad (4) \quad \alpha = 90^\circ : \quad A^l = D_{zx}'' \cdot [-Z_B \cdot \cos \Theta_r] \quad (6)$$

$$B^l = D_{zx}'' \cdot [+Z_E \cdot \cos \Theta_r] \quad (5) \quad B^l = D_{zx}'' \cdot [+Z_B \cdot \sin \Theta_r] \quad (7).$$

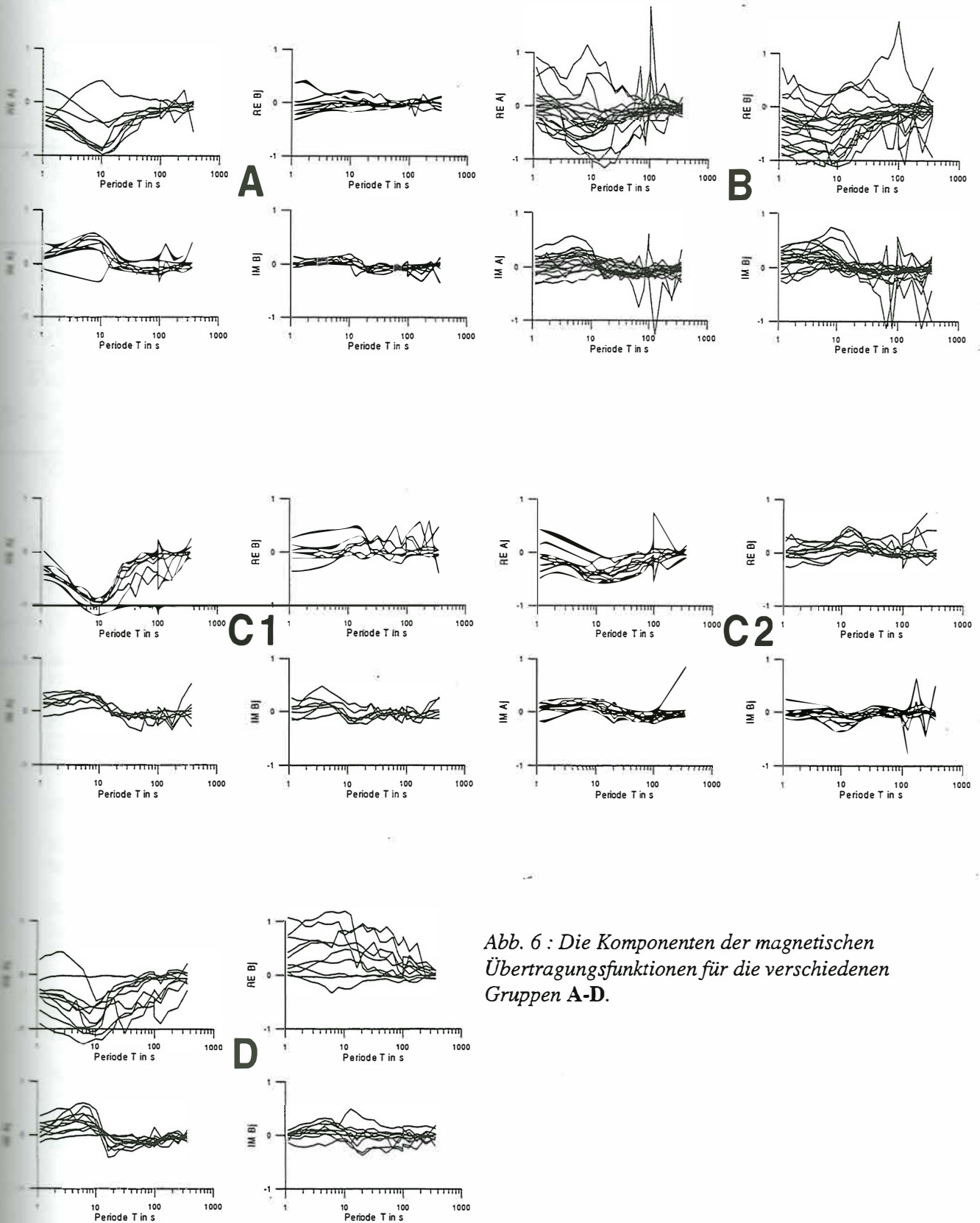


Abb. 6 : Die Komponenten der magnetischen Übertragungsfunktionen für die verschiedenen Gruppen A-D.



Mit regionaler Streichrichtung  $\Theta_r = 45^\circ$  oder  $135^\circ$  ergeben sich folgende Kombinationen aus Tabelle 1): Zuzüglich ist noch der 2-D Fall der nahezu Ost-West streichenden Molasse ( $\alpha = 45^\circ$ ) mitaufgeführt.

	regionale Struktur Penninische Hauptüberschiebung	regionale Struktur Bündnerschiefer B	regionale Struktur Penninische Hauptüberschiebung ; Averser Schiefer D	regionale Struktur Molasse
<b>B</b>	$\Theta_r = 135^\circ, \Theta_l = 135^\circ$ $\alpha = 0^\circ$ $A^l = -D_x'' / \sqrt{2}$ $B^l = -D_x'' / \sqrt{2}$ $\Rightarrow A^l = B^l$		$\Theta_r = 45^\circ, \Theta_l = 135^\circ$ $\alpha = 90^\circ$ $A^l = D_x'' / \sqrt{2}$ $B^l = D_x'' / \sqrt{2}$ $\Rightarrow A^l = B^l$	$\Theta_r = 90^\circ, \Theta_l = 135^\circ$ $\alpha = 45^\circ$ $A^l = -D_x'' \cdot Z_E / \sqrt{2}$ $B^l = +D_x'' \cdot Z_B / \sqrt{2}$ $\Rightarrow A^l = B^l \text{ für } Z_E = -Z_B$
<b>D</b>	$\Theta_r = 135^\circ, \Theta_l = 45^\circ$ $\alpha = 90^\circ$ $A^l = -D_x'' / \sqrt{2}$ $B^l = +D_x'' / \sqrt{2}$ $\Rightarrow A^l = -B^l$	$\Theta_r = 135^\circ, \Theta_l = 45^\circ$ $\alpha = 90^\circ$ $A^l = -D_x'' / \sqrt{2}$ $B^l = +D_x'' / \sqrt{2}$ $\Rightarrow A^l = -B^l$		$\Theta_r = 90^\circ, \Theta_l = 45^\circ$ $\alpha = -45^\circ$ $A^l = -D_x'' \cdot Z_E / \sqrt{2}$ $B^l = -D_x'' \cdot Z_B / \sqrt{2}$ $\Rightarrow A^l = -B^l \text{ für } Z_E = -Z_B$

Tab.1 : Die Komponenten der magnetischen Übertragungsfunktionen  $A^l$  und  $B^l$  in Abhängigkeit zu den verschiedenen Konfigurationen zwischen regionalen und lokalen leitfähigen Strukturen aus Abb. 7.

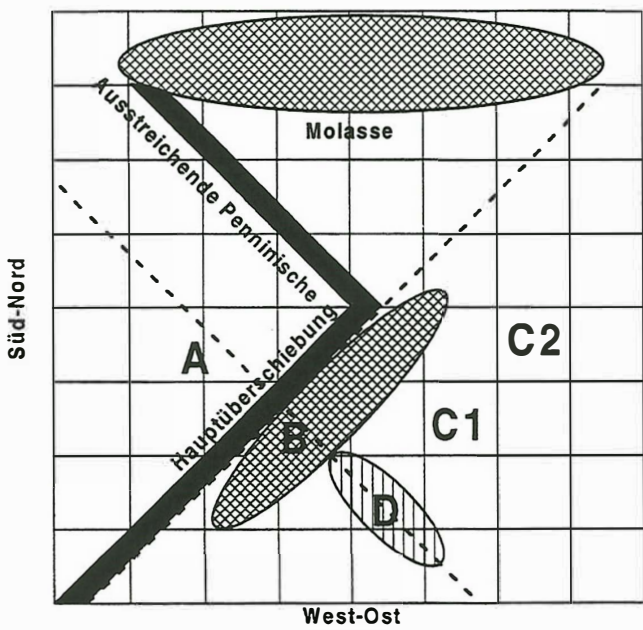


Abb. 7 : Mögliche Konfigurationen lokaler und regionaler leitfähiger Strukturen für die Ostschweizer Alpen. A, B, C1, C2 und D Gruppen der magnetischen Übertragungsfunktionen aus Abbildung 3 und 6, mit B (Bündnerschiefer) und D (Averser Schiefer). Ohne Maßangabe!

## Zusammenfassung

Anhand der oben aufgeführten Überlegungen kann das anomale Verhalten der Realpfeile auf den Bündnerschiefern und gleichzeitig auch auf den Averser Schiefern durch abgelenkte Stromsysteme erklärt werden, die in den regionalen Strukturen Penninische Hauptüberschiebung und (oder) in den Sedimenten der Molasse induziert werden.

Der skizzierte spezielle Verlauf der Front der Penninischen Hauptüberschiebung bietet auch die Möglichkeit die südwärts gerichteten Realpfeile der Gruppe A zu erklären. Die Magnetfeldvariationen in Ost-West Richtung wären innerhalb des rechtwinkligen Dreiecks minimal. Am Eckpunkt ausserhalb der Struktur sollten die Längen der Realpfeile maximal sein. Diese Hypothese muß jedoch noch durch weitere Meßpunkte bekräftigt werden.

Eine Wechselwirkung nur zwischen den beiden lokalen Strukturen Bündnerschiefer und Averser Schiefer ist auch denkbar. Hierzu scheint aber die Längserstreckung der Strukturen zu gering zu sein, um für den Periodenbereich von  $T = 1 - 30$  s, und vermutlich darüber hinaus, in ihnen geeignete Ströme zu induzieren. Daher soll in der weiteren Bearbeitung noch der Periodenbereich der wirksamen magnetischen Verzerrung auf die Daten eingegrenzt werden. Die Anwendung der 'Hypothetical Event Analysis' soll dann zunächst die obigen Ergebnisse bestätigen und die regionalen und lokalen Streichwinkel weiter eingrenzen.

## Literatur :

Blundell, D., R. Freemann, et al. (1992). A continent revealed. The European Geotraverse. Cambridge, Cambridge University Press.

Pfiffner, O. A. and L. Hitz (1997). Geologic interpretation of the seismic profiles of the Eastern Traverse (lines E1-E3, E7-E9): eastern Swiss Alps. Results of NRP 20: Deep Structures of the Swiss Alps. P. Heitzmann. Basel, Birkhäuser Verlag: 73-100.

Pfiffner, O. A., P. Lehner, et al. (1997). Results of NRP 20: Deep Structure of the Swiss Alps. Basel, Birkhäuser Verlag.

Ritter, P. (1996). Separation of Local and Regional Information in Geomagnetic Response Functions using Hypothetical Event Analysis. Dept. of Geology and Geophysics, Edinburgh, University of Edinburgh: 168.

Ritter, P. and R. Banks (1994). Magnetische Verzerrung der Übertragungsfunktionen in GDS: Trennung von regionaler und lokaler Information mit Hilfe von "Hypothetical Event Analysis". In Bahr, K. und Junge, A. (Hrsg.): Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Höchst im Odenwald, vom 28. -31. März 1994 : 101-108.

Schmid, S. M., P. Rück, et al. (1990). "The significance of the Schams nappes for the reconstruction of the paleotectonic and orogenic evolution of the Penninic zone along the NFP-20 East traverse (Grisons, eastern Switzerland)." Mém. Soc. géol. Fr. 156: 263-287.

Steinmann, M. (1994). "Ein Beckenmodell für das Nordpenninikum der Ostschweiz." Jb. Geol. B. -A 137(4): 675-721.

Teufel, U. (1983). Erdmagnetische Tiefensondierung am Alpennordrand. Diplomarbeit, Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik. München, Ludwig-Maximilians-Universität: 97.