

Erkenntnisse über den Tiefbau der Ostalpen aus neuen seismischen Großexperimenten

Michael BEHM, Ewald BRÜCKL, Werner CHWATAL, Ulrike MITTERBAUER,
CELEBRATION 2000 & ALP 2002 & ALPASS Working Groups

Einleitung

Erste Erkenntnisse über den Aufbau der Lithosphäre von weltweiter Bedeutung wurden von MOHOROVIČIĆ (1909) und CONRAD (1925) aus Erdbebenaufzeichnungen gewonnen. Die Erforschung der Erdkruste in den Ostalpen durch seismische Weitwinkelreflexions- und Refraktionsexperimente (WAR/R) begann vor etwa 40 Jahren mit Profilen, die vom Steinbruch Eschenlohe in Oberbayern ihren Ausgang nahmen (GIESE & PRODEHL, 1976). Von späteren Untersuchungen sei das Alpine Längsprofil ALP'75 genannt, welches sich von den Westalpen entlang des Alpenhauptkammes bis in das Pannonische Becken erstreckte (ALPINE EXPLOSION SEISMOLOGY GROUP, 1976; MILLER et al., 1977; ARIC & GUTDEUTSCH, 1987; YAN & MECHIE, 1989). Eine einheitliche Neuauswertung dieser älteren Profile nahmen SCARASCIA & CASSINIS (1997) vor. DÉZES & ZIEGLER (2001) erstellten eine Karte der Mohorovicic-Diskontinuität (Moho) aus den vielen Einzeldaten. Im Rahmen des modernen TRANSALP-Projektes wurde ein Profil von München über den Hauptkamm der Ostalpen bis nach Verona vermessen. Steil- und Weitwinkelseismik, Tomographie und Methoden der passiven Seismik (Verwendung von Erbebendaten aus temporären Netzen) wurden zu einer integralen Interpretation verbunden (LÜSCHEN et al., 2004). Die Erkenntnisse über den Tiefbau der Ostalpen, über die im vorliegenden Beitrag berichtet werden soll, beruhen auf den Daten der seismischen Großexperimente CELEBRATION 2000 und ALP 2002. Es sind dies zwei Projekte aus einer Reihe neuartiger seismischer Untersuchungen, die Zentraleuropa in einer bisher nicht dagewesenen Dichte überdeckten (GUTERCH et al., 2003a). Erstmals wurde eine 3D-Geometrie in der Anordnung der seismischen Schüsse und Aufnehmer verwirklicht. Dadurch sollten Modelle erstellt werden können, die die komplexen Strukturen der Ostalpen besser als bisher erkennen lassen.

Seismische Daten

Der vorgestellten Arbeit liegen seismische Daten von CELEBRATION 2000 (GUTERCH et al., 2003b) und ALP 2002 (BRÜCKL et al., 2003) zugrunde. Beide Projekte umfassten den gemeinsamen Einsatz von Geophysikern aus insgesamt 17 Nationen. Abbildung 1 zeigt die Anordnung der Schüsse und seismischen Aufnehmer entlang der verschiedenen Profile. Es wurden die Daten des 3ten Deployments von CELEBRATION 2000 und alle ALP 2002 Daten verwendet. Das 3te Deployment von CELEBRATION 2000 umfasste 55 seismische Schüsse und 844 seismische Aufnehmer, die entlang von 7 Profilen mit einer Gesamtlänge von etwa 2800km angeordnet waren. ALP 2002 umfasste 29 seismische Schüsse und 947 seismische Aufnehmer, die auf 23 Profile mit einer Gesamtlänge von 4300km verteilt waren. Die seismischen Schüsse hatten zumeist eine Ladung von 300kg, die in 5 Bohrungen von 50 m Tiefe abgetan wurden. Die seismischen Aufnehmer hatten 4,5Hz Geophone und vorprogrammierte Zeitfenster zur Aufnahme. Die von den Schüssen ausgehenden seismischen Wellen wurden von allen auf die verschiedenen Profile verteilten seismischen Aufnehmer aufgezeichnet. Dadurch wurde eine 3D-Geometrie verwirklicht und ein Datenmaterial von ca. 79000 seismischen Spuren gewonnen.

Modelle der oberen Lithosphäre

Zur Interpretation der seismischen Daten wurden sowohl etablierte Methoden, die sich auf die detaillierte Auswertung entlang von Profilen beschränken (2D-Interpretationen), als auch neu entwickelte Techniken verwendet, die direkt zu einem 3D-Bild der oberen Lithosphäre führen.

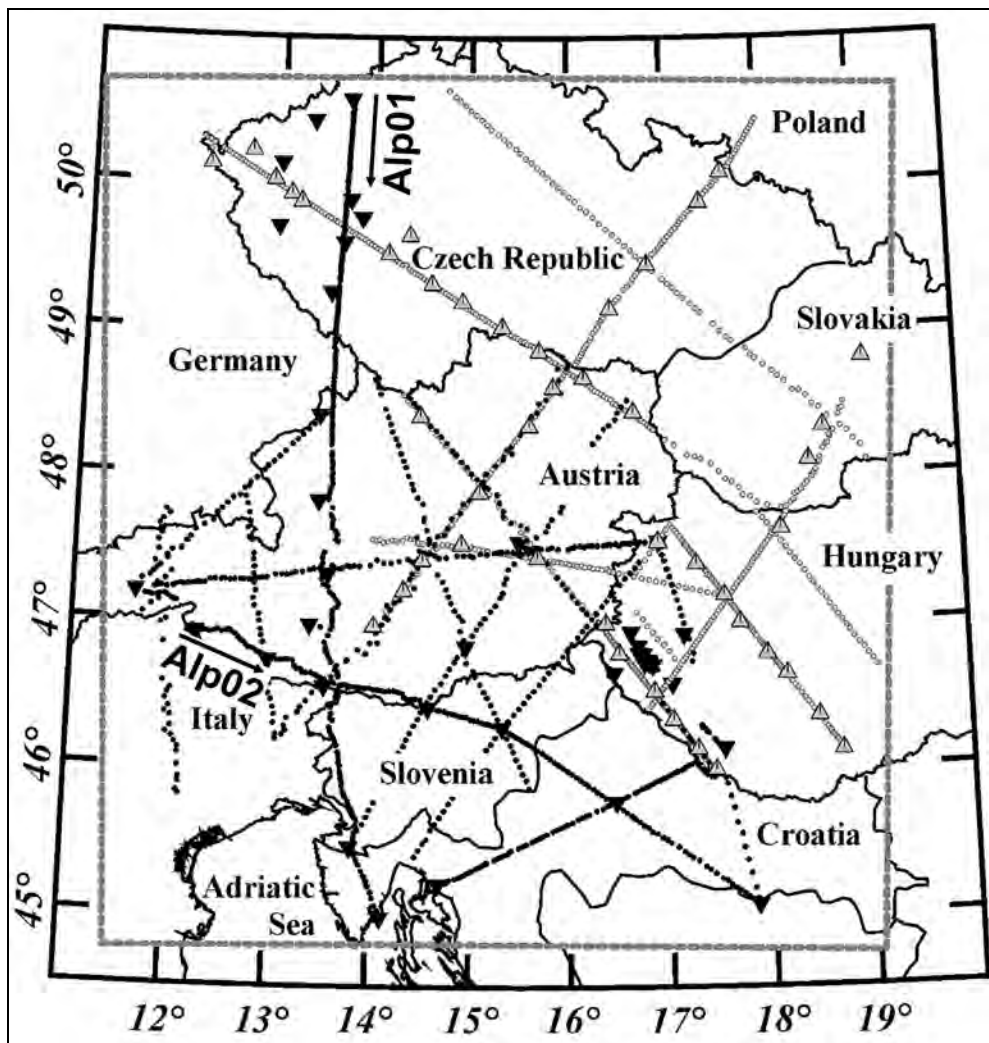


Abb. 1: Geometrie der seismischen Experimente CELEBRATION 2000, 3tes Deployment und ALP 2002.

Die neu entwickelten 3D-Methoden beruhen auf Verfahren der Signaldetektion und Stapelung (Aufsummierung) von einzelnen seismischen Spuren (ASTIZ et al., 1996; BEHM et al., in Druck). Dadurch wurde das z.T. schlechte Signal-Rauschverhältnis und die Schwierigkeiten bei der Interpretation von 3D-Daten überwunden. Tomographische Methoden wurden integriert, um das Modell zu kalibrieren und die Genauigkeit zu erhöhen (BEHM, 2006). Ergebnisse sind ein 3D-Modell der P-Wellengeschwindigkeit der Erdkruste und eine Karte der Mohorovicic-Diskontinuität (Grenze Erdkruste zu Erdmantel, kurz Moho) einschließlich der P-Wellengeschwindigkeit des oberen Erdmantels.

Abbildung 2 zeigt Horizontalschnitte durch das P-Wellengeschwindigkeitsmodell der Erdkruste gemeinsam mit einer tektonischen Übersicht, die im Wesentlichen SCHMID et al. (2004) folgt. In den obersten Kilometern korrelieren die Geschwindigkeiten mit tektonischen Einheiten. Vor allem die Becken sind deutlich abgebildet. Istrien, das durch die Alpine Gebirgsbildung wenig verformte Adriatische Vorland, zeichnet sich durch besonders hohe Geschwindigkeiten aus. Auffallende Strukturen bis zu 10km und teilweise 20km Tiefe finden sich im Böhmischem Massiv und den Austroalpinen Einheiten (z.B. W–E-streichende Zone hoher Geschwindigkeiten nahe der SEMP-Linie). Die Mittel-Ungarische Linie bildet sich als Übergang von geringeren zu höheren Geschwindigkeiten ab. Die Unterkruste konnte durch das 3D-Modell nur teilweise erfasst werden, wobei überdurchschnittlich hohe Geschwindigkeiten im Bereich des Wiener Beckens signifikant sind. Diese hohen Geschwindigkeiten entsprechen auch hohen Dichten, wie aus gravimetrischen Studien belegt werden konnte (BRÜCKL et al., 2006).

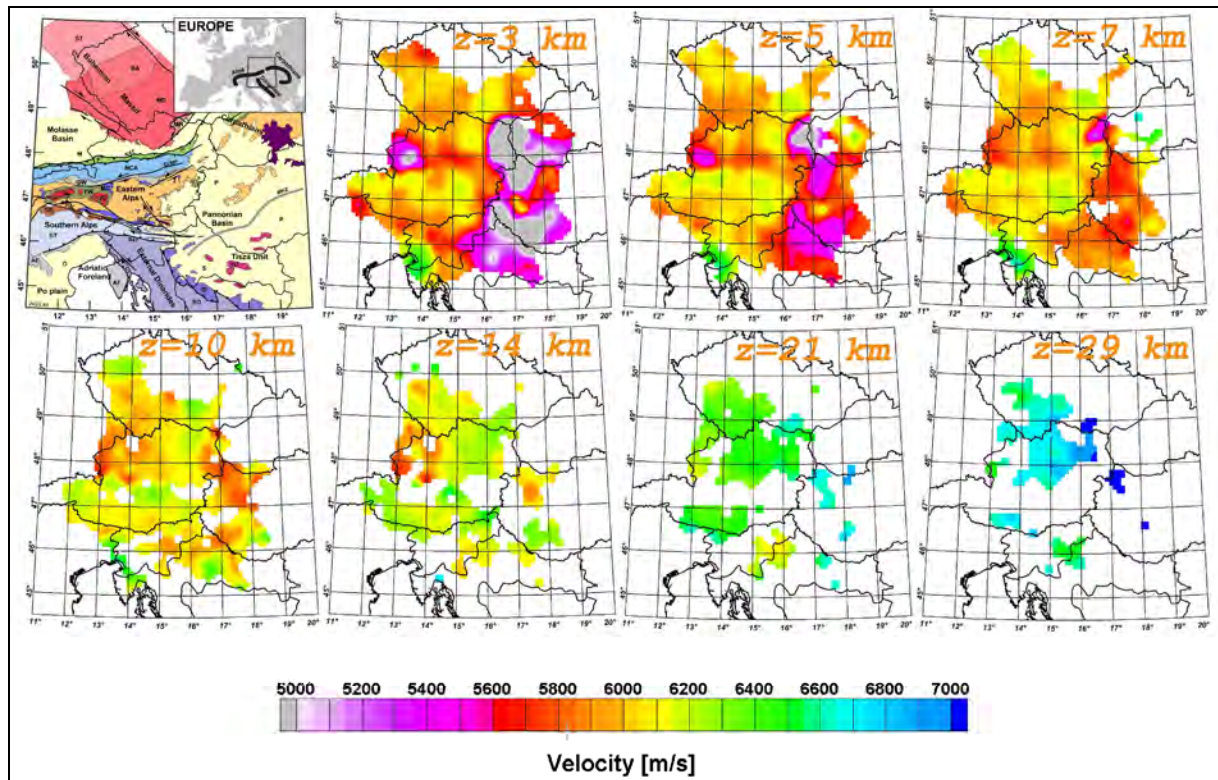


Abb. 2: Tektonische Übersicht und Horizontalschnitte durch das 3D-Modell der P-Wellengeschwindigkeiten durch die Erdkruste.

Tiefenlage und Struktur der Mohorovicic-Diskontinuität sowie die P-Wellengeschwindigkeit des obersten Mantels sind in Abbildung 3 dargestellt. Die großräumige Topographie der Moho entspricht der Europäischen Moho-Karte nach DÉZES & ZIEGLER (2001). Die geringsten Tiefen (24km) finden sich im Pannonischen Becken, die größte Tiefe liegt mit 51km am Südrand des Tauernfensters. Im Westen kann die neue Moho-Karte zwanglos mit dem TRANSALP-Profil verbunden werden (LÜSCHEN et al., 2004; BLEIBINHAUS et al., 2006), im Norden findet sie durch die Auswertungen entlang des Profils CEL10 (HRUBCOVÁ et al., 2006) eine Bestätigung. Das interessanteste Ergebnis ist die Fragmentierung der Moho in 3 Blöcke: die Europäische Platte, die Adriatische Mikroplatte und das Pannonische Fragment. Bisherige Auswertungen entlang von Profilen (YAN & MECHIE, 1989; SCARASCINI & CASSINIS, 1997) ließen diese Gliederung nur ansatzweise erkennen.

Detaillierte Auswertungen von refraktierten seismischen Wellen sowie Weitwinkelreflexionen von krusteninternen Diskontinuitäten, der Moho und dem obersten Erdmantel mit Hilfe der Methode der interaktiven „ray-tracings“ wurden bisher entlang der beiden wichtigsten Linien Alp01 und Alp02 abgeschlossen (BRÜCKL et al., in Druck). Die aus den seismischen Modellen abgeleiteten tektonischen Modelle sind in Abbildung 4 dargestellt. Generell spiegeln diese 2D-Modelle die im 3D-Modell aufgelösten Strukturen wider, zeigen jedoch mehr Detail und krusteninterne Strukturen. Die Fragmentierung der Moho wird durch diese Profile bestätigt. Die auf dem TRANSALP-Profil gefundene Sub-Tauern Rampe wurde auch in die Modelle von Alp01 und Alp02 eingeführt und ist in ihrer Lage durch die Struktur der Moho und tektonische Linien an der Oberfläche (SEMP) fixiert.

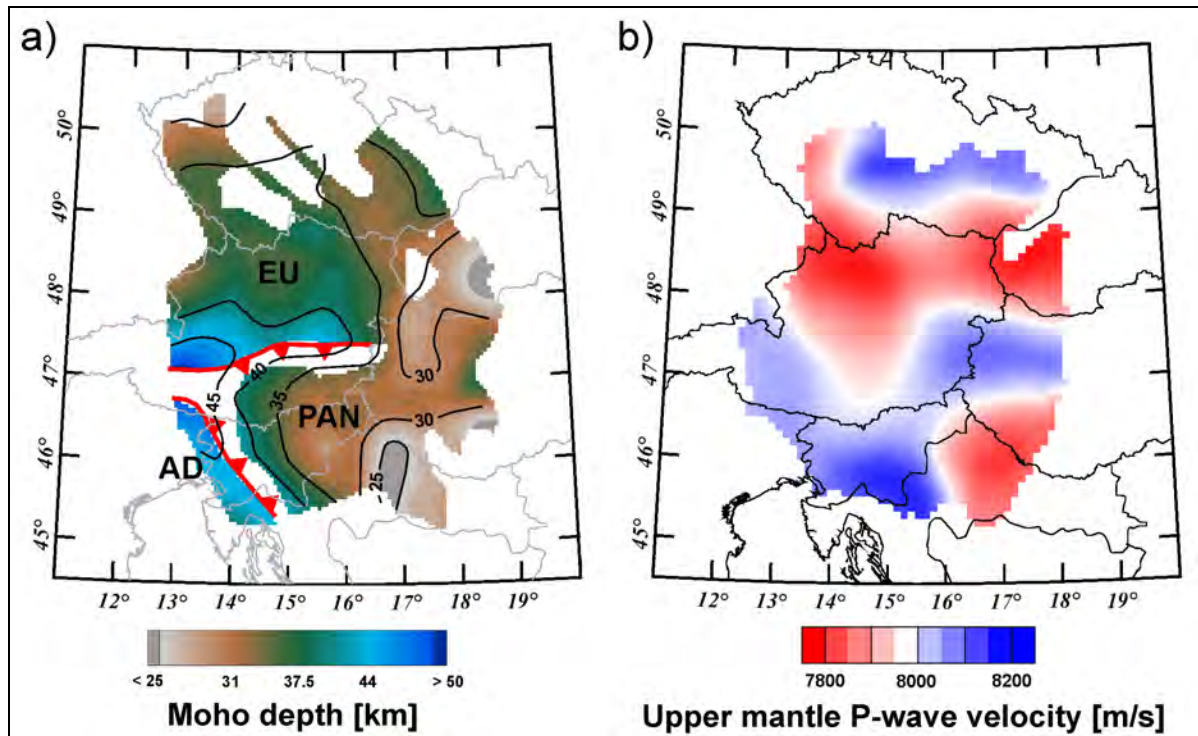


Abb. 3: Karte der Moho-Diskontinuität (a) und P-Wellengeschwindigkeit des obersten Erdmantels (b); EU – Europäische Platte, AD – Adriatische Mikroplatte, PAN – Pannonisches Fragment.

Auf der Basis der bisher erarbeiteten Modelle wurde eine tektonische Hypothese entwickelt, die die drei Lithosphärenfragmente mit der N–S-gerichteten Kollision von Europa und Afrika und der nachfolgenden Extrusions- bzw. Escape-Tektonik (RATSCHBACHER et al., 1991) in Verbindung bringt (Abbildung 5). Nach dieser Hypothese waren zum Zeitpunkt der Kollision die Adriatische Mikroplatte und das Pannonische Fragment eine Einheit, unter welche die Europäische Platte subduzierte. Die durch die Kollision verursachte, vertikale Extrusion von Teilen der Europäischen Platte erfolgte im gesamten Bereich des Tauernfensters entlang der Sub-Tauern-Rampe. Die mit fortschreitender Kompression zwischen Europa und Afrika einhergehende, laterale Escape-Tektonik in Richtung Pannonisches Becken (nach ESE) verursachte ein Ausdünnen der Erdkruste. Das Pannonische Fragment wurde durch ein sprunghaftes Ansteigen der Moho gebildet, wobei isostatischer Ausgleich die treibende Kraft war. In weiterer Folge erleichtert das Abtauchen Adriatischer Lithosphäre unter das Pannonische Fragment die fortschreitende N–S-gerichtete Konvergenz. Der Tripelpunkt zwischen den drei Lithosphärenblöcken könnte auch die Verzweigung von östlichen Ostalpen und Dinariden darstellen.

Laufende Arbeiten

Die Daten von CELEBRATION 2000 und ALP 2002 sind noch nicht voll ausgewertet. So sind weitere 2D-Interpretationen entlang ausgewählter Profile im Gang. Obwohl die beiden Experimente als P-Wellen Untersuchungen geplant waren, liefern sie auch wertvolle Informationen über die Verteilung der S-Wellen-Geschwindigkeiten. Mit zusätzlicher Kenntnis der S-Wellengeschwindigkeit wird auch eine differenziertere Beziehung zu Gesteinsdichten und gravimetrischen Daten hergestellt werden können.

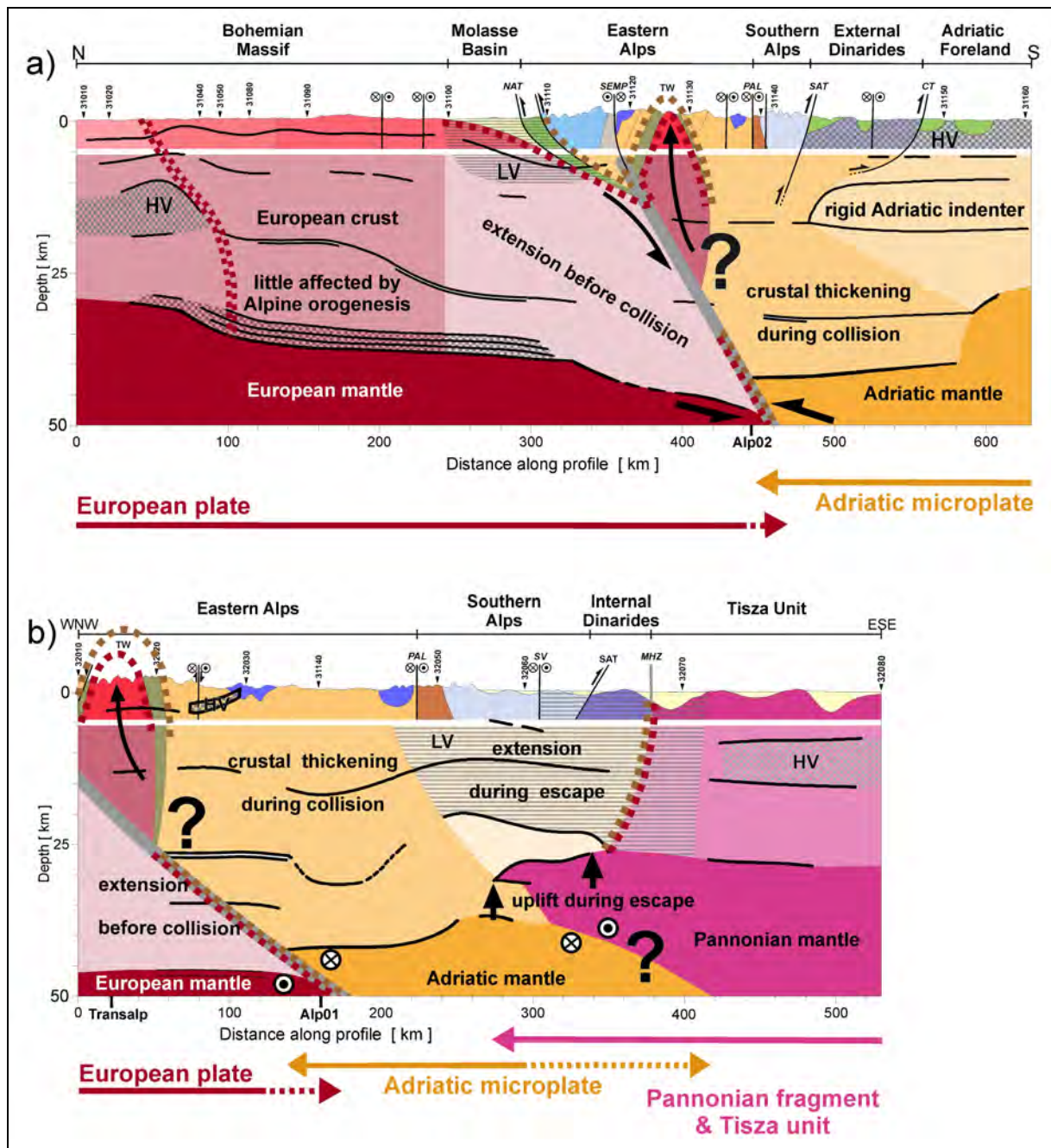


Abb. 4: Tektonische Modelle der seismischen Profile Alp01 (a) und Alp02 (b) (BRÜCKL et al., in Druck).

Ein laufendes Großprojekt stellt ALPASS dar. Durch ein temporäres seismisches Netzwerk von 63 Stationen und die Abfrage permanenter Stationen über den Zeitraum eines Jahres (2005–2006) wurden Daten gewonnen, die die Erkundung der tieferen Lithosphäre und Asthenosphäre ermöglichen werden (Abbildung 6). Hierbei sollen die teleseismischen Untersuchungen von LIPPITSCH et al. (2003) nach Osten hin erweitert werden. Das neue 3D-Modell der Erdkruste wird in diese Arbeiten integriert werden und eine genauere Auswertung im östlichen Teil der Ostalpen ermöglichen. Die Aufzeichnungen der temporären Stationen zusammen mit dem neuen Modell der seismischen Geschwindigkeiten erlauben auch eine präzise Lokalisierung von Beben. Besonderes Augenmerk soll hierbei dem oberen Mürztal, dem Semmering und dem Wiener Becken gewidmet werden. In diesem Bereich soll das bestehende seismische Netz der ZAMG langfristig verdichtet werden.

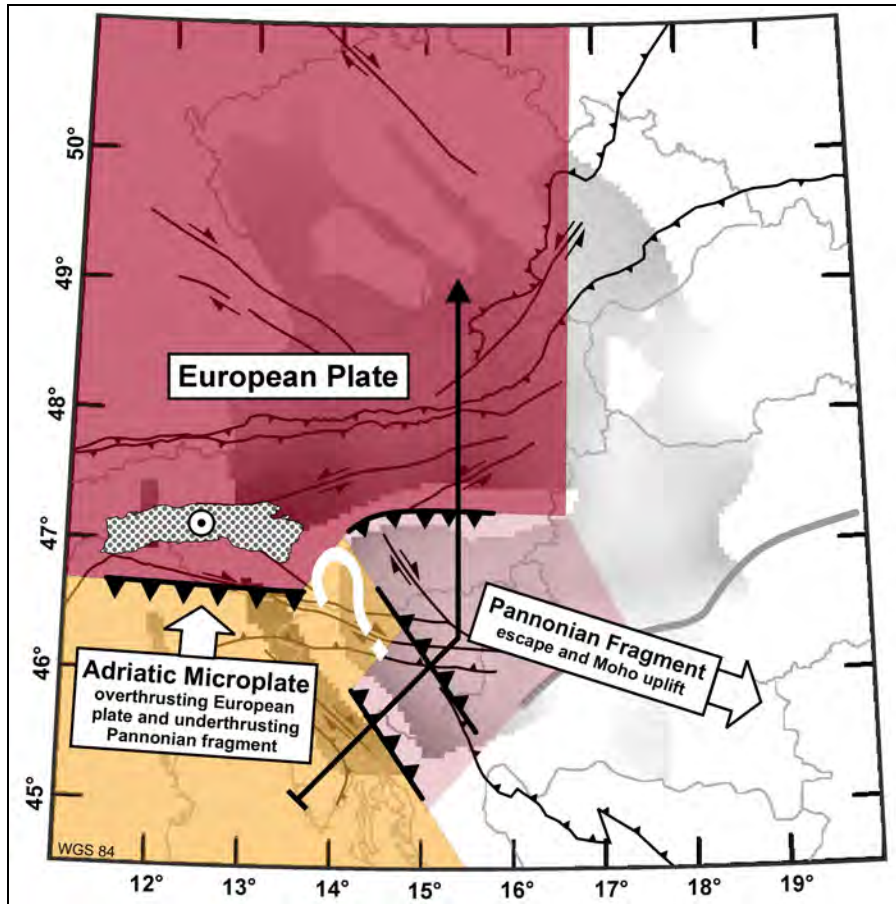


Abb. 5: Neogene Kinematik der drei Lithosphärenblöcke EU, AD und PAN.

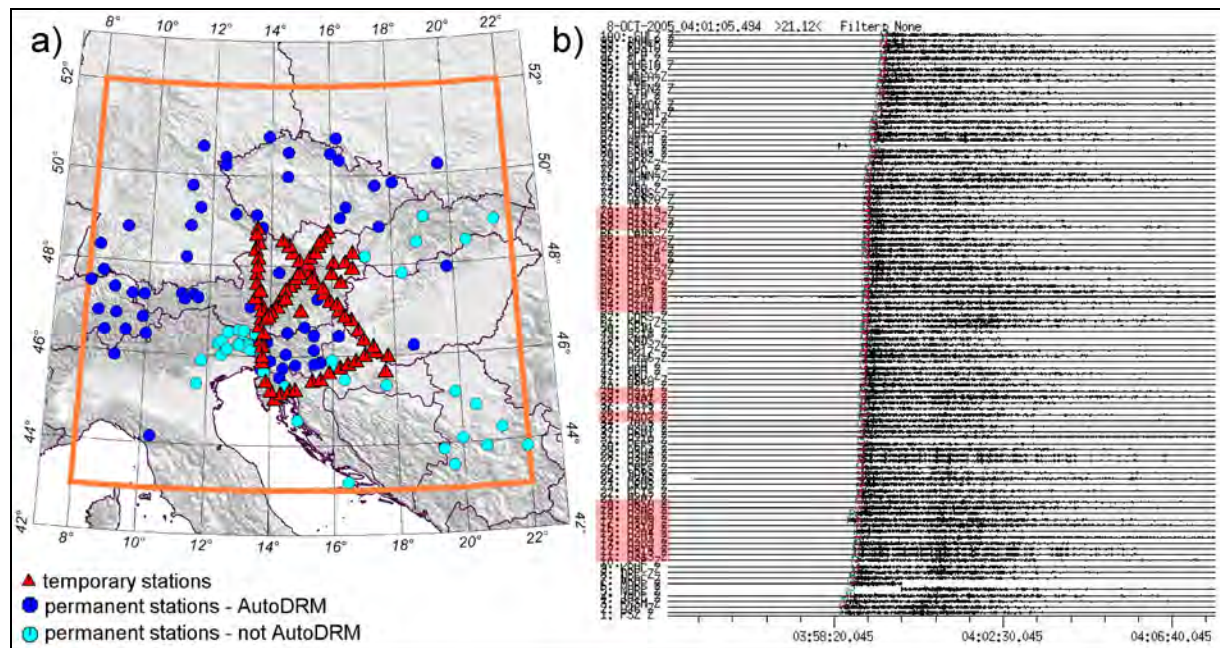


Abb. 6: ALPASS Beobachtungsstationen (a) und Aufzeichnungen des Bebens vom 8. Oktober 2005 in der Kashmir-Tibet-Grenzregion, Magnitude 7,7 durch temporäre (rot markiert) und permanente Stationen (b).

Bedankung

Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden (bzw. werden) durch die ÖAW (Geophysik der Erdkruste), den FWF (P15576), das ehemalige BMBWK und die Länder Steiermark und Kärnten gefördert. Die als Autoren nicht genannten Mitglieder der Arbeitsgruppen von CELEBRATION 2000, ALP 2002 und ALPASS sind:

S. Acevedo, K. Aric, A. Belinsky, F.D. Binder Bleibinhaus, T. Bodoky, R. Clowes, W. Czuba, E. Gaczyński, M. Ford, H. Gebrande, A. Gosar, M. Grad, H. Grassl, A. Guterch, Z. Hajnal, S. Harder, E. Hegedüs, S. Hock, V. Hoeck, P. Hrubcová, T. Janik, G. Jentzsch, P. Joergensen, A. Kabas, G. Kaip, G.R. Keller, K. Komminhaho, F. Kohlbeck, S. Kostiuhenko, A. Kovacs, E. Kozlovskaya, D. Kracke, A. Lambrecht, W. Loderer, K.C. Miller, A. Morozov, J. Oreskovic, K. Posgay, E.-M. Rumpfhuber, C. Schmid, R. Schmöllner, O. Selvi, C. Snelson, A. Špičák, P. Šroda, F. Sumanovac, E. Takács, H. Thybo, T. Tiira, C. Tomek, C. Ullrich, A. Velasco, J. Vozár, F. Weber, M. Wilde-Piórko, J. Yliniemi.

Großer Dank gebührt auch den vielen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihren Einsatz während der Datenakquisition.

Referenzen

- ALPINE EXPLOSION SEISMOLOGY GROUP (1976): A lithospheric seismic profile along the axis of the Alps, 1975. I: First Results. – *PURE APPL. GEOPHYS.*, 114, 1109–1130.
- ARIC, K. & R. GUTDEUTSCH (1987): Geophysical aspects of the crustal structures of the Eastern Alps. – In: H.W. FLUEGEL & P. FAUPL (Eds.): *Geodynamics of the Eastern Alps*, Franz Deuticke Verlag, 309–360.
- ASTIZ, L., EARLE, P. & P. SHEARER (1996): Global stacking of broadband seismograms. – *Seismological Research Letters*, 67, 4, 8–18.
- BEHM, M. (2006): Accuracy and Resolution of a 3D Seismic Model of the Eastern Alps. – PhD Thesis, Vienna University of Technology, 157
- BEHM, M., E. BRÜCKL, W. CHWATAL & H. THYBO (in Druck): Application of stacking techniques to 3D wide-angle reflection and refraction seismic data of the Eastern Alps. – *Geophys. J. Int.*, in press.
- BLEIBINHAUS, F., BRÜCKL, E. & ALP 2002 Working Group (2006): Wide-angle observations of ALP 2002 shots on the TRANSALP profile: Linking the two DSS projects. – *Tectonophysics*, 414 (1–4), 71–78, doi:10.1016/j.tecto.2005.10.027
- BRÜCKL, E., T. BODOKY, E. HEGEDUES, P. HRUBCOVÁ, A. GOSAR, M. GRAD, A. GUTERCH, Z. HAJNAL, G.R. KELLER, A. ŠPIČÁK, F. SUMANOVAC, H. THYBO, F. WEBER & ALP 2002 Working Group (2003): ALP 2002 Seismic Experiment. – *Stud. Geophys. Geod.*, 47, 671–679
- BRÜCKL, E., U. MITTERBAUER & M. BEHM (2006): Studies on crustal structure and gravity in the Eastern Alps, in *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*. – In: F. SANSONO & A.J. GIL (Eds.): *IAG Symposium 131*, Springer, 181–192.
- BRÜCKL, E. et al. (in Druck): Crustal Structure Due to Collisional and Escape Tectonics in the Eastern Alps Region Based on Profiles Alp01 and Alp02 from the ALP 2002 Seismic Experiment. – *J. Geophys. Res.*
- CONRAD, V. (1925): Laufzeiten des Tauernbebens vom 28. November 1923. – *Mitt. Erdb.-Komm. Wien*, 59, 1–23.
- DÉZES, P. & P.A. ZIEGLER (2001): European Map of the Mohorovicic discontinuity. – 2nd EUCOR-URGENT Workshop (Upper Rhine Graben Evolution and Neotectonics), Mt. St. Odile, France.
- GIESE, P. & C. PRODEHL (1976): Main features of crustal structure in the Alps. – In: P. GIESE & C. PRODEHL (Eds.): *Explosion seismology in Central Europe*, Springer, 347–375.
- GUTERCH, A., M. GRAD, A. ŠPIČÁK, E. BRUECKL, G.R. KELLER, H. THYBO & Working Group (2003a): An overview of recent seismic refraction experiments in Central Europe. – *Stud. Geophys. Geod.*, 47, 651–657.
- GUTERCH, A., M. GRAD, G.R. KELLER, K. POSGAY, J. VOZAR, A. ŠPIČÁK, E. BRUECKL, Z. HAJNAL, H. THYBO, O. SELVI & CELEBRATION 2000 Experiment Team (2003b): CELEBRATION 2000 Seismic Experiment. – *Stud. Geophys. Geod.*, 47, 659–669.

- HRUBCOVÁ, P., P. ŠRODA, A. ŠPIČÁK, A. GUTERCH, M. GRAD, G.R. KELLER, E. BRUECKL & H. THYBO (2005): Crustal and uppermost mantle structure of the Bohemian massif based on CELEBRATION 2000 data. – *J. Geophys. Res.*, 110, B11305, doi:10.1029/2004JB003080.
- LIPPITSCH, R., E. KISSLING & J. ANSORGE (2003): Upper mantle structure beneath the Alpine orogen from high-resolution teleseismic tomography. – *J. Geophys. Res.*, 108(B8), 2376, doi:10.1029/2002JB002016.
- LÜSCHEN, E., B. LAMMER, H. GEBRANDE, K. MILLAHN, R. NICOLICH & TRANSALP Working Group (2004): Orogenic structure of the Eastern Alps, Europe, from TRANSALP deep seismic reflection profiling. – *Tectonophysics*, 388, 85–102.
- MILLER, H., H. GEBRANDE & E. SCHMEDES (1977): Ein verbessertes Strukturmodell für die Ostalpen, abgeleitet aus refraktionsseismischen Daten unter Berücksichtigung des Alpenlängsprofils. – *Geol. Rundschau*, 66, 289–308.
- MOHOROVIČIĆ, A. (1909): Das Beben vom 8. X. 1909. – *Jb. met. Obs. Zagreb (Agram)*, 9, 1–63.
- RATSCHBACHER, L., W. FRISCH, H.G. LINZER & O. MERLE (1991): Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2.: Structural analysis. – *Tectonics*, 10, 2, 257–271.
- SCARASCIA, S. & R. CASSINIS (1997): Crustal structures in the central-eastern Alpine sector: a revision of available DSS data. – *Tectonophysics*, 271, 157–188.
- SCHMID, S., B. FÜGENSCHUH, E. KISSLING & R. SCHUSTER (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. – *Swiss Journal of Geosciences*, 07, 1, 93–117.
- YAN, Q.Z. & J. MECHIE (1989): A fine structural section through the crust and lower lithosphere of the Alps. – *Geophysical Journal*, 98, 465–488.

Univ.-Ass. Dr. DI Michael BEHM, Prof. Dr. DI Ewald BRÜCKL, Mag. Werner CHWATAL, Dr. DI Ulrike MITTERBAUER: Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27–29, A 1040 Wien, Österreich. CELEBRATION 2000 & ALP 2002 & ALPASS Working Groups.